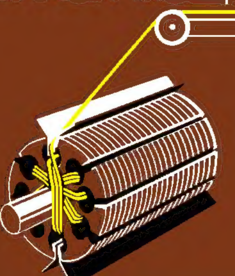
И.Л.ОСИН, М.В.АНТОНОВ

УСТРОЙСТВО И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ



ВШ

ББК 31.261
О-73
УДК 621.313

Рецензенты: канд. техн. наук В. П. Комаров (Всесоюзный научно-исследовательский институт государственной патентной экспертизы) и инж. П. И. Катнлюс (Вильнюсское отделение всесоюзного научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института малых электрических машин)

Осин И. Л., Антонов М. В.

О-73 Устройство и производство электрических машин малой мощности: Учеб. пособие для СПТУ.— М.: Высш. шк., 1988. — 215 с.: ил.

В книге рассмотрены основные конструкции электрических машин малой мощности: силовых, исполнительных, информационных. Описан принцип действия микромашин, применяемых в бытовой технике и автоматических устройствах. Рассмотрены технологические процессы производства электрических машин малой мощности.

Учебное пособие также может быть использовано при профессиональном обучении рабочих на производстве.

О $\frac{2302030000(4307000000)—220}{052(01)—88}$ 32—88

ББК 31.261
6П2.1.081

ПРЕДИСЛОВИЕ

Решение выдвинутой на XXVII съезде КПСС задачи ускорения научно-технического прогресса неразрывно связано с развитием автоматизированного производства во всех отраслях народного хозяйства. Основными силовыми элементами различного рода автоматов, роботов, манипуляторов являются электрические машины. В последние годы особенно возросла потребность в электрических машинах малой мощности, широко используемых в автоматических устройствах и приборах бытовой техники.

Для решения разнообразных технических и производственных задач, стоящих перед электромашиностроением, требуются кадры квалифицированных специалистов, помощь в подготовке которых и должно оказать настоящее учебное пособие.

Так как электрические машины малой мощности очень разнообразны по конструкции и технологии, в книге рассматриваются вопросы устройства и производства наиболее распространенных из них.

Пособие написано с использованием курса математики и физики на базе программы средней школы.

Авторы выражают благодарность рецензентам канд. техн. наук В. П. Комарову и инж. П. И. Катилюсу за ценные советы и замечания, сделанные при прочтении рукописи.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Классификация электрических машин малой мощности

Электрические машины, мощность которых составляет от долей ватта до 1000 Вт, называют *электрическими машинами малой мощности* или *микромашинами.* За последние десятилетия производство таких машин превратилось в самостоятельную отрасль, которая выпускает десятки миллионов штук микромашин в год и по темпам развития опережает другие отрасли электротехники. Электрические машины малой мощности широко применяют в промышленности, сельском хозяйстве, быту и специальной технике. Они являются важным элементом во многих системах автоматического управления, контроля и регулирования.

Микромашины условно можно разделить на две группы: *общего назначения* и *автоматических устройств.* В первую группу входят различные двигатели (асинхронные, синхронные, коллекторные), предназначенные в основном для индивидуального привода механизмов, во вторую группу — микромашины (исполнительные двигатели, тахогенераторы, поворотные трансформаторы, сельсины), выполняющие силовые и информационные функции. Классификация электрических машин малой мощности показана на рис. 1.

Основными показателями работы микромашин первой группы являются полезная мощность, коэффициент полезного действия (кпд) и коэффициент мощности, а второй группы — точность работы, быстродействие и стабильность характеристик.

Возрастающее применение электрических машин малой мощности во всех областях производственной деятельности привело к необходимости разработки многочисленных конструктивных форм микромашин, соответствующих различным условиям их эксплуатации. В книге рассматриваются лишь основные типы и конструкции микромашин, получившие наиболее широкое распространение.

§ 2. Основные законы, правила и определения в электротехнике

Для облегчения понимания и лучшего усвоения материала, изложенного в книге, напомним основные законы, правила и определения, используемые в теории электрических машин.

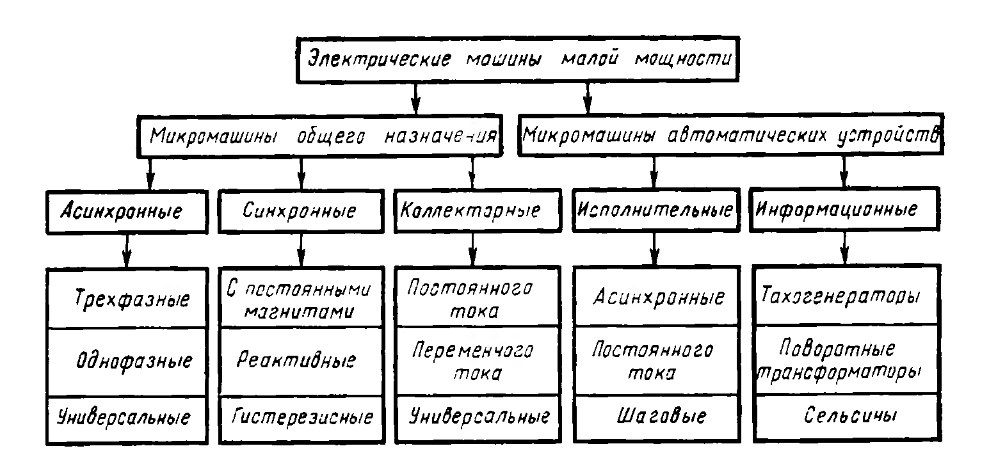


Рис. 1. Классификация электрических машин малой мощности

Преобразователи механической энергии в электрическую (генераторы) и электрической энергии в механическую (двигатели) называют *электрическими машинами.*

Любая электрическая машина представляет собой электромагнитную систему, которая состоит из магнитных (магнитопровода) и электрических (обмоток) цепей. Преобразование энергии в электрических машинах основано на явлении *электромагнитной индукции* и связано с электродвижущими силами (эдс), которые индуцируются в электропроводящих контурах при изменении магнитного поля, происходящем при механическом перемещении обмоток или элементов магнитопровода.

Образование магнитного поля. Рассмотрим простейшую электрическую машину (рис. 2), состоящую из неподвижного статора *1* и вращающегося ротора *2,* разделенных воздушным зазором δ. В пазах сердечников статора *1* и ротора *2* размещены обмотка *3* статора, состоящая из одной катушки с числом витков w_1, и обмотка *4* ротора, состоящая также из одной катушки с числом витков w_2. Обмотки статора и ротора присоединены к электрическим сетям с напряжениями U_1 и U_2. С помощью вала *5* ротор сопряжен с другой машиной,

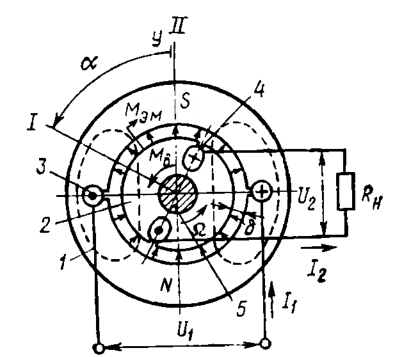


Рис. 2. Электромагнитная схема простейшей электрической машины:

1, 2 — сердечники статора и ротора, *3, 4* — обмотки статора и ротора, *5* — вал; *I, II* — оси обмоток ротора и статора

с которой он обменивается механической энергией (получает в режиме генератора и отдает в режиме двигателя).

Предположим, что электрическая машина работает в режиме генератора, т. е. получает механическую энергию от приводного двигателя. В этом случае на вал действует внешний вращающий момент $M_в$ и ротор вращается с угловой скоростью Ω. Подключим обмотку статора к сети постоянного тока с напряжением U_1 (В) *. Тогда, согласно *закону Ома для электрической цепи*, в ней появится постоянный ток I_1 (А) (направление тока на нас указано точкой, а от нас — крестиком)

$$I_1 = U_1/R_1, \tag{1}$$

где R_1 — активное сопротивление обмотки статора, Ом.

Ток I_1, проходя по катушке с числом витков w_1, образует магнитодвижущую силу (мдс) (А)

$$F_1 = I_1 w_1, \tag{2}$$

Эта сила, согласно *закону Ома для магнитной цепи*, создает в машине магнитный поток (Вб)

$$\Phi_1 = F_1/R_{м.ц}, \tag{3}$$

где $R_{м.ц}$ — магнитное сопротивление магнитной цепи, А/Вб.

Направление магнитного потока определяется *правилом правого винта* (буравчика). В рассматриваемой машине поток выходит из сердечника статора внизу и входит в него вверху, образуя два полюса. Полюс, из которого поток выходит, называют *северным N*, а полюс, в который поток входит,—*южным S*. Пути потока можно представить магнитными силовыми линиями, которые всегда замкнуты сами на себя. Две такие линии показаны на рис. 2.

Из формулы (3) видно, что чем меньше магнитное сопротивление, тем меньшая требуется мдс и, следовательно, меньший ток для создания магнитного потока. Сопротивление магнитной цепи (см. рис. 2) складывается из сопротивлений трех участков — сердечников статора, ротора и воздушного зазора:

$$R_{м.ц} = R_{м.с} + R_\delta + R_{м.р} = l_с/(\mu_0\mu_с^* S_с) + l_\delta/(\mu_0 S_\delta) + l_р/(\mu_0\mu_р^* S_р), \tag{4}$$

где $R_{м.с}$, $R_{м.р}$ и R_δ — магнитные сопротивления сердечников статора, ротора и воздушного зазора; $S_с$, $S_р$ и S_δ — площади сердечников статора, ротора и воздушного зазора, через которые проходит поток, м^2; $\mu_0 = 0{,}4\pi \cdot 10^{-6}$ — магнитная проницаемость воздуха, Гн/м; $\mu_с^*$, $\mu_р^*$ — относительные магнитные проницаемости сердечников статора и ротора; $l_с$, $l_р$ и l_δ — длины пути потока по сердечникам статора, ротора и воздушному зазору, м.

Относительная магнитная проницаемость μ^* указывает, во сколько раз магнитная проницаемость данного материала отличается от магнитной проницаемости воздуха. Дерево, картон, медь, алюминий обладают такой же магнитной проницаемостью, как и воздух. Конструкционная сталь имеет магнитную проницаемость в сотни раз большую, а специальная электротехническая сталь — в тысячи раз большую, чем воздух.

* Единицы величин соответствуют Международной системе единиц (СИ).

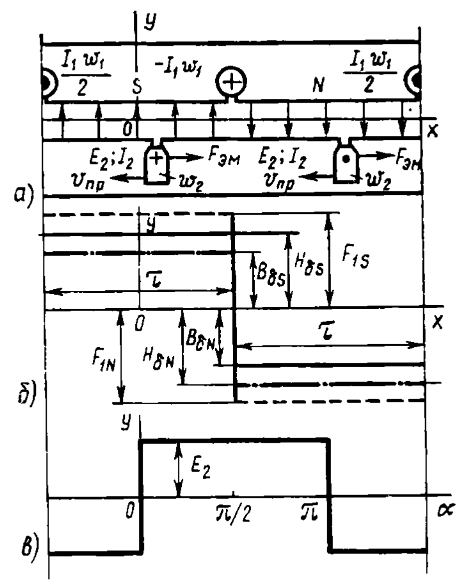


Рис. 3. Развертка электрической машины (*а*), распределение магнитного поля статора (*б*) и наведенная в обмотке ротора эдс (*в*)

Чтобы сопротивление магнитной цепи было минимальным, сердечники электрических машин изготовляют из электротехнической стали. С этой же целью обмотки размещают в пазах магнитопровода, а не на их поверхности. При такой конструкции воздушный зазор можно выбрать минимально возможным, исходя из технологических ограничений, и получить малое сопротивление магнитной цепи.

Поскольку магнитное сопротивление сердечников статора и ротора по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного зазора мало, можно принять, что $R_{м.ц} = R_\delta$. Поделив правую и левую части уравнения (3) на S_δ, получим с учетом уравнений (2) и (4) *закон полного тока*:

$$B_\delta l_\delta/\mu_0 = F_1 \text{ или } H_\delta \cdot 2\delta = I_1 w_1, \tag{5}$$

где $B_\delta = \Phi_\delta/S_\delta$ — индукция магнитного поля в воздушном зазоре, Тл; $H_\delta = B_\delta/\mu_0$ — напряженность магнитного поля в воздушном зазоре, А/м; $l_\delta = 2\delta$ — длина пути потока по воздушному зазору, м.

В общем случае (с учетом магнитных сопротивлений стальных участков) закон полного тока можно записать в виде

$$H_с l_с + H_\delta l_\delta + H_р l_р = I_1 w_1 \text{ или } \sum_{i=1}^{i=n} H_i l_i = I_i w_i, \tag{6}$$

где H_i — напряженность магнитного поля на i-м участке магнитной цепи; l_i — длина участка; n — число участков.

Наведение эдс. Установив, что постоянный ток, проходя по катушке или обмотке, создает вокруг нее постоянное магнитное поле, выясним, как оно распределено в воздушном зазоре по окружности ротора. Для этого мысленно разрежем статор и ротор вдоль образующей цилиндрической поверхности и нарисуем развертку ма-

шины (рис. 3,*а*). Ось y направим по оси обмотки статора, ось x — вдоль расточки статора.

При $R_{м.ц}=R_\delta$ из формулы (5) закона полного тока следует, что мдс и напряженность магнитного поля меняются скачком в тех местах, где проходит ток. На протяжении полюсного деления τ (длина дуги окружности ротора, приходящейся на один полюс) мдс и напряженность магнитного поля постоянны. При постоянном воздушном зазоре ($\delta=\text{const}$) мдс полюсов одинаковы: $|F_{1S}|=|F_{1N}|=I_1w_1/2$ и $|H_{\delta S}|=|H_{\delta N}|=H_\delta=I_1w_1/(2\delta)$.

Таким образом, мдс и напряженность магнитного поля в воздушном зазоре распределены по прямоугольному закону. По такому же закону распределена и индукция магнитного поля в воздушном зазоре $|B_{\delta S}|=|B_{\delta N}|=B_\delta=H_\delta/\mu_0$ (рис. 3,*б*).

При вращении ротора с угловой скоростью Ω (рад/с) проводники его обмотки перемещаются относительно магнитного поля статора с линейной скоростью (м/с):

$$v_{пр}=\Omega D_р/2=\Omega\tau/\pi=2\tau n, \quad (7)$$

где $D_р$ — внешний диаметр ротора, м; $\tau=\pi D_р/2$ — полюсное деление, м; $n=\Omega/(2\pi)$ — частота вращения ротора, об/с. В этом случае согласно *закону электромагнитной индукции* в проводниках обмотки ротора наводится эдс:

$$E_{2пр}=B_\delta L_{пр}v_{пр}, \quad (8)$$

где $E_{2пр}$ — эдс, наведенная в одном проводнике, В; $L_{пр}=L_р$ — активная (находящаяся в магнитном поле) длина проводника, равная аксиальной длине сердечника ротора $L_р$, м.

Направление эдс $E_{2пр}$ определяется *правилом правой руки* (рис. 4,*а*). Заметим, что при движении по виткам катушки ротора эдс всех проводников суммируются. Поэтому суммарная эдс на зажимах обмотки ротора

$$E_2=2w_2B_\delta L_р v_{пр}=4w_2\Phi_\delta n, \quad (9)$$

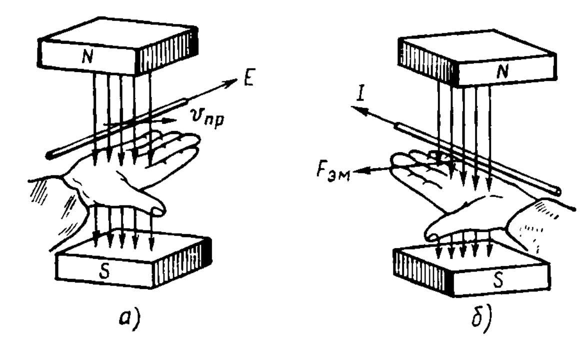


Рис. 4. Правило правой (*а*) и левой (*б*) руки

где $2w_2=N_2$ — общее число проводников обмотки ротора; $\Phi_\delta=B_\delta L_р\tau$ — магнитный поток в воздушном зазоре, Вб.

Часть электрической машины, в которой индуцируется эдс, называется *якорем*. В рассматриваемой машине якорем является ротор. Из выражений (8) и (9) видно, что эдс повторяет форму индукции в воздушном зазоре и, следовательно, при вращении якоря изменяется во времени. Если измерять угол поворота ротора углом α (угол между осями обмоток статора и ротора, рис. 2), то эдс в проводниках обмотки якоря будет отсутствовать, когда $\alpha=\pi k$ при $k=0, 1, 2, \dots$ (см. рис. 3,*в*).

Период изменения эдс (с) соответствует повороту ротора на угол $\alpha=2\pi$ и равен $T=2\pi/\Omega$, откуда частота изменения эдс (Гц)

$$f=1/T=\Omega/(2\pi)=n. \quad (10)$$

Таким образом, в обмотке якоря простейшей машины при $I_1=\text{const}$ индуцируется переменная эдс прямоугольной формы, частота изменения которой определяется частотой вращения ротора.

Если нагрузка генератора отсутствует ($R_н=\infty$, $I_2=0$), напряжение на выходных зажимах обмотки якоря равно эдс ($U_2=E_2$). Такой режим работы генератора называют *режимом холостого хода*.

Энергетические соотношения. Предположим, что обмотка ротора, обладающая внутренним активным сопротивлением R_2, с помощью скользящих контактов замкнута на сопротивление нагрузки $R_н$. Тогда, согласно закону Ома, в образовавшейся электрической цепи появится переменный ток I_2, который изменяется одновременно с эдс:

$$I_2=E_2/(R_2+R_н). \quad (11)$$

Уравнение (11) может быть записано по *правилу Кирхгофа* в виде *уравнения равновесия напряжений*:

$$U_2=E_2-I_2R_2, \quad (12)$$

где $U_2=I_2R_н$ — падение напряжения на нагрузке, являющееся напряжением на выходе генератора; I_2R_2 — падение напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки ротора.

Умножим левую и правую части уравнения (12) на ток I_2:

$$U_2I_2=E_2I_2-I_2^2R_2. \quad (13)$$

Первый член уравнения (13) представляет собой полезную электрическую мощность (Вт) $P_2=U_2I_2$, передаваемую генератором в нагрузку, второй член — электромагнитную мощность (Вт) $P_{эм}=E_2I_2$, преобразованную с помощью магнитного поля из механической мощности, а третий член — электрические потери (Вт) $P_{эл2}=I_2^2R_2$, выделяемые в виде теплоты в обмотке ротора.

Мощность P_1 (Вт), поступаемая от источника постоянного тока в обмотку статора, не подвергается электромеханическому преобразованию и полностью превращается в теплоту:

$$P_1 = P_{эл\,1} = U_1 I_1 = I^2{}_1 R_1. \qquad (14)$$

В реальной электрической машине кроме электрических потерь $P_{эл}$ существуют еще механические $P_{мех}$ и магнитные $P_м$ потери. Механические потери складываются из потерь от трения (в подшипниках, ротора о воздух и т. п.). Магнитные потери, т. е. потери в стали, возникают в сердечнике якоря и складываются из потерь от перемагничивания сердечника, появляющихся из-за *явления гистерезиса* в стали, и от вихревых токов. Потери от вихревых токов обусловлены тем, что при вращении ротора в магнитном поле наводится эдс не только в проводниках, но и в стали сердечника. Под ее действием в сердечнике проходят вихревые токи, вызывающие электрические потери. Для уменьшения потерь от вихревых токов сердечники выполняют шихтованными, т. е. набирают из тонких изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

Полезная мощность всегда меньше подведенной (затраченной) мощности на суммарное значение потерь. Отношение полезной мощности к подведенной представляет собой кпд электрической машины:

$$\eta = P_2/(P_2 + \Sigma P), \qquad (15)$$

где $\Sigma P = P_{эл1} + P_{эл2} + P_{мех} + P_м$ — сумма потерь в машине.

При нагрузке ($R_н \neq \infty$, $I_2 \neq 0$) проводники обмотки ротора с током находятся в магнитном поле статора. Согласно *закону электромагнитных сил*, в этом случае на них действует электромагнитная сила (Н)

$$F_{эм.п} = N_{2п} B_\delta L_{пр} I_2, \qquad (16)$$

где $N_{2п}$ — число проводников, лежащих в одном пазу, на которые действует сила $F_{эм.п}$.

Направление этой силы определяется *правилом левой руки* (рис. 4,*б*). Поскольку проводники размещены в диаметрально расположенных пазах, возникающие электромагнитные силы образуют пару сил (см. рис. 3,*а*) и создают электромагнитный момент машины (Н·м):

$$M_{эм} = F_{эм.п} D_р = 2w_2 \Phi_\delta I_2/\pi = c_м \Phi_\delta I_2, \qquad (17)$$

где $\Phi_\delta = B_\delta L_р \tau$ — магнитный поток одного полюса; $c_м$ — постоянная. Из выражения (17) видно, что электромагнитный момент в электрической машине создается в результате взаимодействия магнитного поля статора с током ротора.

Для работы электрической машины в установившемся режиме необходимо постоянство частоты вращения ротора, что возможно при выполнении определенного условия — сумма действующих на ротор моментов должна быть равна нулю:

$$M_в + M_{эм} = 0. \qquad (18)$$

Таким образом, в генераторном режиме электрическая машина создает тормозной электромагнитный момент ($M_{эм} < 0$), препятствующий вращению вала ротора под действием внешнего момента ($M_в > 0$). Электромагнитный момент действует как на ротор, так и на статор, поэтому последний должен быть надежно закреплен на фундаменте.

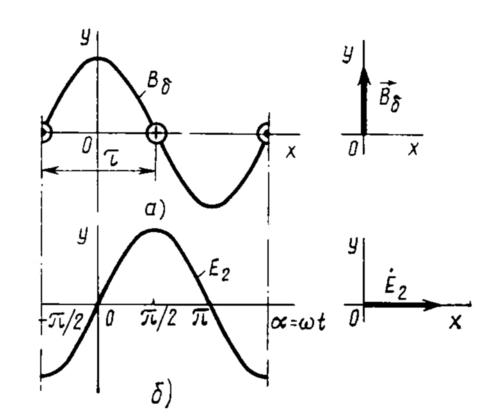


Рис. 5. Графическое представление гармонических функций:
а — пространственных, *б* — временных

Гармонические функции в электрических машинах. В современных электрических машинах обмотки статора и ротора состоят из нескольких катушек, размещенных в пазах. С увеличением числа пазов кривые распределения мдс и магнитного поля приобретают форму, близкую к синусоидальной. Если принять за начало отсчета ось обмотки статора, кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре (в пространстве) будет иметь косинусоидальную форму (рис. 5,*а*):

$$B_\delta = B_{\delta max} \cos \alpha = B_{\delta max} \cos(\pi x/\tau). \qquad (19)$$

В этом случае наведенная в обмотке ротора эдс изменяется во времени по синусоидальному закону с угловой частотой $\omega = 2\pi f$ (рис. 5,*б*):

$$E_2 = E_{2max} \sin \omega t = E_{2max} \sin \alpha = E_{2max} \cos(\alpha - \pi/2), \qquad (20)$$

где E_{2max} — амплитудное значение эдс (определяется выражением (9) при подстановке $B_\delta = B_{\delta\,max}$).

Величины, изменяющиеся по синусоидальному или косинусоидальному закону, называются *гармоническими функциями* и могут изображаться графически на координатной плоскости в виде векторов, длина которых равна максимальному значению функции. Так, гармонические функции индукции B_δ и эдс E_2 могут быть представлены на плоскости *yox* (рис. 5) соответственно пространственным вектором $\vec{B}_\delta$ и временным вектором $\dot{E}_2$. В первом случае под осью *y* подразумевают ось обмотки статора, во втором — ось времени. Таким образом, максимальное значение индукции имеет место на оси обмотки статора.

В электрических цепях переменного тока различают активное R, индуктивное X_L и емкостное X_C сопротивления. Рассмотрим влияние характера сопротивления нагрузки генератора на ток в обмотке якоря. Для большей наглядности совместим амплитудное значение

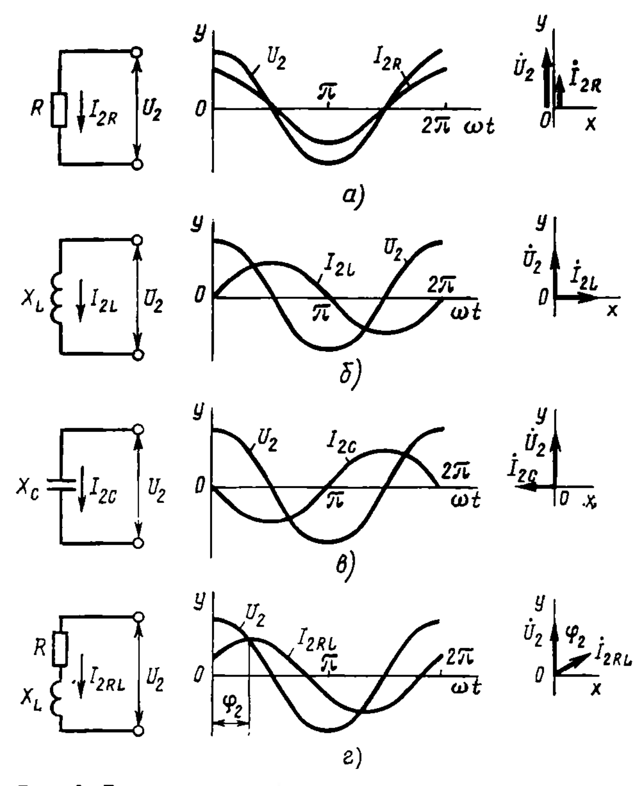


Рис. 6. Взаимное расположение векторов тока и напряжения при активной (*а*), индуктивной (*б*), емкостной (*в*) и активно-индуктивной (*г*) нагрузках

выходного напряжения генератора, приложенного к нагрузке, с осью ординат. Тогда напряжение на выходных зажимах обмотки якоря $U_2 = U_{2\max}\cos\omega t$.

При *активном сопротивлении* нагрузки ток в обмотке якоря и нагрузке изменяется одновременно с выходным напряжением генератора:

$$I_{2R} = I_{2R\max}\cos\omega t, \qquad (21)$$

где $I_{2R\max} = U_{2\max}/R$ — амплитудное значение тока, А. При этом временные векторы тока $\dot I_{2R}$ и напряжения $\dot U_2$ совпадают по фазе (рис. 6,*а*).

При *индуктивном сопротивлении* нагрузки ток в обмотке якоря отстает во времени от выходного напряжения генератора на угол 90°:

$$I_{2L} = I_{2L\max}\cos(\omega t - \pi/2), \qquad (22)$$

где $I_{2L\max} = U_{2\max}/X_L$ — амплитудное значение тока, А; $X_L = \omega L$ — индуктивное сопротивление нагрузки, Ом; L — индуктивность нагрузки, Гн. В этом случае вектор тока $\dot I_{2L}$ повернут по ходу часовой стрелки относительно вектора напряжения $\dot U_2$ на угол 90° (рис. 6,*б*).

При *емкостном сопротивлении* нагрузки ток в обмотке якоря опережает во времени выходное напряжение генератора на угол 90°:

$$I_{2C} = I_{2C\max}\cos(\omega t + \pi/2), \qquad (23)$$

где $I_{2C\max} = U_{2\max}/X_C$ — амплитудное значение тока, А; $X_C = 1/(\omega C)$ — емкостное сопротивление нагрузки, Ом; C — емкость конденсатора нагрузки, Ф. Вектор тока $\dot I_{2C}$ повернут относительно вектора напряжения $\dot U_2$ против движения стрелки часов на угол 90° (рис. 6,*в*).

В общем случае при смешанной нагрузке (например, активно-индуктивной) ток в обмотке якоря отстает от выходного напряжения генератора на некоторый угол φ_2 (рис. 6,*г*):

$$I_{2RL} = I_{2RL\max}\cos(\omega t - \varphi_2), \qquad (24)$$

где $I_{2RL\max} = U_{2\max}/(\sqrt{R^2 + X_L^2})$; $\varphi_2 = \operatorname{arctg}(X_L/R)$ — угол сдвига во времени тока $\dot I_{2RL}$ относительно напряжения $\dot U_2$.

На практике чаще используют не максимальные, а действующие значения гармонических токов, напряжений и эдс:

$$I_{2д} = I_{2\max}/\sqrt{2};\ U_{2д} = U_{2\max}/\sqrt{2};\ E_{2д} = E_{2\max}/\sqrt{2}. \qquad (25)$$

Действующие значения электрических величин более удобны для измерения и расчета электрических мощностей. Так, при гармонических токе и напряжении, сдвинутых во времени относительно друг друга на угол φ_2, активную и реактивную мощности определяют по таким формулам:

$$P_2 = U_{2д}I_{2д}\cos\varphi_2;\ Q_2 = U_{2д}I_{2д}\sin\varphi_2, \qquad (26)$$

где $\cos\varphi_2$ — коэффициент мощности.

Произведение $I_{2д}\cos\varphi_2$ представляет собой проекцию вектора тока $\dot I_{2д}$ на направление вектора напряжения $\dot U_2$ и называется *активной составляющей тока*; произведение $I_{2д}\sin\varphi_2$ является проекцией вектора тока $\dot I_{2д}$ на направление, перпендикулярное вектору напряжения $\dot U_2$, и называется *реактивной составляющей* тока. Коэффициент мощности характеризует соотношение между активной и реактивной мощностями. Чем выше $\cos\varphi_2$, тем бо́льшая активная мощность передается от генератора к нагрузке. В дальнейшем используют в основном действующие значения электрических величин, поэтому индекс «д» в обозначениях опускают.

Основные законы, правила и определения, используемые в теории электрических машин, были рассмотрены на примере работы простейшего генератора. По *принципу Ленца* любая электрическая машина обратима, т. е. может работать как в режиме

генератора, так и двигателя. Поэтому и основные положения, изложенные в этом параграфе, общеприменимы к любому типу электрических машин.

§ 3. Материалы, применяемые в электрических машинах малой мощности

При производстве электрических машин малой мощности используют различные материалы, которые разделяют на активные (магнитные и проводниковые), изоляционные и конструкционные.

Магнитные материалы. Для изготовления сердечников электрических машин в основном применяют тонколистовую электротехническую сталь, марки которой обозначают четырьмя цифрами (ГОСТ 21427.2—83). Наиболее распространены марки стали 2011, 2012, 2112, 2212, 2013.

Первая цифра означает вид прокатки и структурное состояние стали (1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная). Изотропная сталь имеет одинаковые магнитные свойства во всех направлениях, анизотропная обладает большей магнитной проницаемостью, но лишь вдоль проката.

Вторая цифра указывает содержание в стали кремния. По содержанию кремния стали подразделяют на шесть групп. Стали первой группы обозначаются цифрой 0 и содержат кремния не более 0,4% (нелегированные стали), стали шестой группы — цифрой 5 и содержат кремния до 4,8% (высоколегированные стали). Стали с высоким содержанием кремния обладают большим удельным электрическим сопротивлением и, следовательно, меньшими удельными потерями от вихревых токов.

Третья цифра означает удельные потери в стали от гистерезиса и вихревых токов. В зависимости от значения индукции и частоты перемагничивания, для которых нормированы удельные потери, стали подразделяют на пять групп, которые обозначают цифрами 0, 1, 2, 6, 7.

Рис. 7. Кривые намагничивания:

1 — основная электротехнической стали, *2* — петля гистерезиса, *3* — воздуха

Четвертая цифра указывает порядковый номер типа стали. Так, марка стали 2013 означает, что сталь холоднокатаная изотропная, нелегированная, удельные потери нормированы при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц, тип стали — третий.

Электротехническую сталь выпускают в виде рулонов, листов и резаной ленты толщиной 0,28; 0,30; 0,35; 0,50 мм с термостойким электроизоляционным покрытием или без покрытия. Магнитные свойства стали характеризуются основной кривой намагничивания *1* — зависимостью магнитной индукции *B* от напряженности магнитного поля *H* (рис. 7). В слабых магнитных полях индукция растет линейно с увеличением напряженности (участок *ОА*), в сильных — возрастание индукции замедляется (участок *АБ*) и, наконец, наступает насыщение стали (точка *Б*). При дальнейшем увеличении напряженности индукция в стали растет так же, как в воздухе (линия *ВГ* параллельна кривой намагничивания воздуха *3*). Если сталь находится в переменном магнитном поле, она перемагничивается, что происходит с отставанием индукции от напряженности по гистерезисной кривой *2*, образующей гистерезисную петлю. Петля гистерезиса характеризуется остаточной индукцией B_r и коэрцитивной силой H_c. Площадь петли пропорциональна потерям в стали от перемагничивания (гистерезиса). Электротехнические стали имеют малые значения B_r и H_c и узкую петлю гистерезиса, поэтому называются *магнитно-мягкими*.

В электрических микромашинах часто применяют и *магнитнотвердые* материалы, имеющие широкую петлю гистерезиса и в тысячу раз большие значения B_r и H_c, чем магнитно-мягкие стали. Такие сплавы называют *постоянными магнитами* и используют в качестве источников постоянных магнитных полей.

Проводниковые материалы. К проводниковым материалам, применяемым в электрических микромашинах, в первую очередь относят медь и алюминий, обладающие малым удельным электрическим сопротивлением.

Для обмоток статора используют медные круглые провода, чаще с эмалевой изоляцией марок ПЭВ-2, ПЭТВ-2, ПЭТВМ, ПЭМФ, ПЭФ-155 *. Для изготовления коллекторных пластин машин постоянного тока применяют твердотянутую медь. Для короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных машин используют алюминиевые сплавы, чаще марок А6, АК10, АКЦ11-12 и др. Алюминий, хотя и имеет удельное электрическое сопротивление в 1,7 раза выше, чем медь, но обладает в 3,3 раза меньшей плотностью. Поэтому на единицу массы алюминий имеет вдвое более высокую проводимость, чем медь.

В микромашинах автоматических устройств широко применяют латуни (сплав меди с цинком), бронзы (сплавы меди с кадмием, бериллием, фосфором), драгоценные металлы (серебро, золото, платина), материалы с термостабильными свойствами (константан, манганин).

При всем разнообразии физических свойств все проводниковые материалы обладают магнитной проницаемостью, практически равной магнитной проницаемости воздуха.

---

* Провода ПЭМФ и ПЭФ-155 предназначены для машин, работающих в среде масла и фреона (холодильники, кондиционеры воздуха и т. п.).

Электроизоляционные материалы. Электроизоляционные материалы применяют в электрических машинах для изоляции частей, находящихся под разными напряжениями (обмоточных проводов, пазов, лобовых частей обмотки от корпуса, выводных концов обмоток). Такие важные технико-экономические показатели, как надежность, срок службы и работоспособность микромашин, в большой степени зависят от качества изоляции.

При нагреве электрических машин происходит старение изоляции, т. е. потеря изолирующих свойств и механической прочности. В зависимости от нагревостойкости (способность материала выполнять свои функции при длительном воздействии температуры) изоляционные материалы разделяют на семь классов:

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	C
Наибольшая допустимая температура, °C	90	105	120	130	155	180	свыше 180

К классам нагревостойкости Y, A, E относят текстильные материалы (на основе хлопка, натурального шелка), целлюлозные (картон, фибра), лакоткани, натуральные смолы, к классам B, F, H и C — материалы на основе щепаной слюды, волокнистого стекла, асбеста, кремнийорганические лаки и смолы, керамику и асбестоцемент.

В качестве изоляционных материалов в машинах малой мощности применяют в основном различные органические пленки: полиэтилентерефталатные (лавсан) ПЭТ-Э (ГОСТ 24234—80), полиамидные, фторопластовые и иногда пленкоэлектрокартон. В настоящее время электрические машины классов нагревостойкости Y и A не выпускают.

Конструкция электрических машин должна обеспечивать их хорошее охлаждение, чтобы температура нагрева не превышала пределов, установленных для соответствующих классов изоляции. При нормальной работе электрической машины изоляция обмоток должна выдерживать длительное воздействие переменного электрического поля, кратковременные перенапряжения и механические воздействия, которым она подвергается в процессе производства и эксплуатации.

Конструкционные материалы. Для изготовления частей электрических машин, воспринимающих, несущих и передающих механические нагрузки, применяют конструкционные материалы: черные, цветные металлы и пластмассы.

В электрических микромашинах из черных металлов используют в основном прокатную сталь (круглая, шестигранная, листовая) при производстве валов, втулок, болтов, гаек и других деталей. Из цветных металлов широко применяют алюминиевые сплавы Ал2, А9 и другие для изготовления литых корпусов, подшипниковых щитов, втулок. В последние годы значительно возросло использование пластмасс. Из термореактивных пластмасс изготовляют контактные платы, изоляционные втулки, щеткодержатели, траверсы, коллекторы и т. п. Возможности применения пластмасс в микромашинах еще далеко не исчерпаны.

Контрольные вопросы

1. Как создается магнитное поле в электрической машине?
2. Почему сердечники статора и ротора электрической машины выполняют из электротехнической стали?
3. Объясните процесс наведения эдс в контуре.
4. Какие потери существуют в электрической машине?
5. Назовите условия образования электромагнитной силы, действующей на проводник.
6. Почему обмотки статора и ротора располагают в пазах?
7. Назовите классы нагревостойкости электроизоляционных материалов.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

ГЛАВА I. ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

§ 4. Общие сведения

Электрические машины переменного тока, у которых частота вращения их подвижной части (ротора) отличается от частоты вращения магнитного поля, называют *асинхронными двигателями* (АД). Они являются самыми распространенными электрическими машинами в народном хозяйстве. Асинхронные двигатели используют в приводах станков, насосов, вентиляторов, электроинструментов, холодильных агрегатов, стиральных машин и т. п. Широкое распространение АД объясняется технологичностью их конструкции, надежностью в работе, хорошими эксплуатационными свойствами, невысокой стоимостью и простотой обслуживания.

Режим работы асинхронных двигателей, для которого они предназначены заводом-изготовителем, называют ***номинальным***. Такой режим характеризуется номинальными величинами: полезной мощностью $P_{2ном}$ (Вт), линейным напряжением $U_{1ном}$ (В), линейным током $I_{1ном}$ (А); частотой тока $f_{1ном}$ (Гц); кпд $\eta_{ном}$ (%); коэффициентом мощности $\cos\varphi_{1ном}$; частотой вращения $n_{2ном}$ (об/мин). Эти величины указывают на щитке двигателя. Кроме того, на щитке или в паспорте АД приводят следующие данные: тип машины, число фаз, схему соединения фаз, режим работы, класс изоляции, завод-изготовитель и др.

Асинхронные двигатели могут быть двухполюсными ($2p=2$; p — число пар полюсов) и многополюсными ($2p>2$; $p>1$).

Трехфазные АД имеют обмотку, состоящую из трех однофазных обмоток ($A—X$, $B—Y$, $C—Z$), называемых ***фазами***. Буквы A, B, C обозначают начала, а X, Y, Z — концы фаз. Оси фаз сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол $120°/p$. Фазы могут быть соединены между собой по схеме «звезда» (рис. 8,*а*) или «треугольник» (рис. 8,*б*). Независимо от схемы соединения фаз к обмотке АД всегда прикладывается трехфазное переменное синусоидальное линейное напряжение сети:

$$U_{AB}=\sqrt{2}U_c \sin \omega t;\ U_{BC}=\sqrt{2}U_c \sin(\omega t-2\pi/3);\ U_{CA}= =\sqrt{2}U_c \sin(\omega t+2\pi/3), \qquad (27)$$

где $U_c=U_л$ — действующее значение линейного напряжения (напряжения между проводами сети), В; $\omega=2\pi f_1$ — угловая частота изменения напряжения, рад/с.

Фазные напряжение $U_ф$ и ток $I_ф$ зависят от схемы соединения фаз:

при соединении фаз звездой (Y)

$$U_{фY}=U_л/\sqrt{3} \text{ и } I_{фY}=I_л; \qquad (28)$$

при соединении фаз треугольником (Δ)

$$U_{фΔ}=U_л \text{ и } I_{фΔ}=I_л/\sqrt{3}. \qquad (29)$$

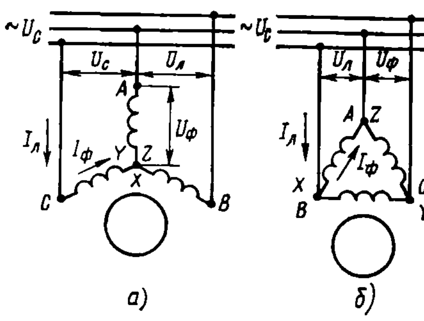


Рис. 8. Схемы соединения фаз трехфазного АД звездой (*а*) и треугольником (*б*)

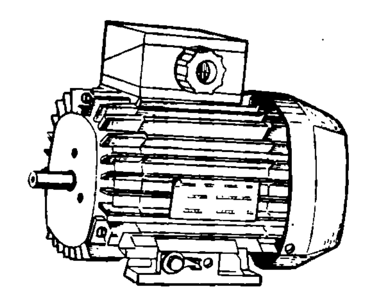
Таким образом, любой трехфазный АД можно использовать для работы от сетей с двумя различными напряжениями, отличающимися в $\sqrt{3}$ раз. Поэтому на щитке и в паспорте этого АД всегда указывают два напряжения, например 380/220 В. Это означает, что при напряжении сети $U_c=380$ В обмотку статора необходимо соединить звездой, а при $U_c=220$ В — треугольником. В обоих случаях фазное напряжение будет одинаковым (220 В).

§ 5. Устройство трехфазных асинхронных микродвигателей

По конструктивному исполнению АД малой мощности разнообразны. Выпускаемые промышленностью двигатели группируют в серии, характеризуемые едиными требованиями к технико-экономическим показателям, принципами конструкции и технологией изготовления.

Для трехфазных АД малой мощности наиболее характерной является конструкция двигателей серии промышленного назначения 4А. Отрезок серии 4А с осями вращения высотой 45, 50, 56, 63 и 71 мм охватывает трехфазные двигатели мощностью $P_{2ном}=40\div1100$ Вт при $2p=2$ и мощностью $P_{2ном}=25\div750$ Вт при $2p=4$. Двигатели этой серии имеют закрытое обдуваемое исполнение. При каждой высоте оси вращения выполняют машины с двумя длинами сердечников и двумя числами пар полюсов.

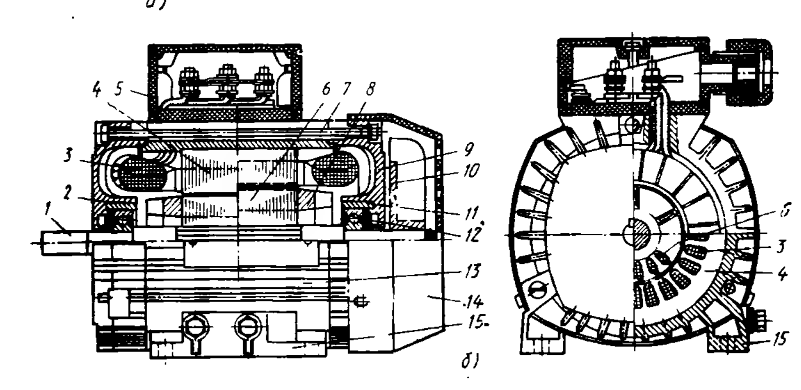
На рис. 9,*а*,*б* показаны общий вид и устройство двигателей 4АА56В2 и 4АА56В4. Первая цифра в обозначении двигателя указывает порядковый номер серии, следующие за цифрой буквы — тип двигателя (асинхронный) и материал корпуса (алюминиевый сплав), цифры за буквами — высоту оси вращения (мм); последующая буква — длину машины (А — первая длина, В — вторая),



а)

Рис. 9. Общий вид (*а*) и устройство трехфазного асинхронного электродвигателя серии 4А (*б*):

1 — вал, *2, 9* — передний и задний подшипниковые щиты, *3, 4* — обмотка и сердечник статора, *5* — коробка выводов, *6, 8* — сердечник и обмотка ротора, *7* — стяжной болт, *10* — вентилятор, *11* — стальная втулка, *12* — подшипник качения, *13* — станина (корпус), *14* — кожух вентилятора, *15* — лапы



последняя цифра — число полюсов двигателя. На фронтальном разрезе (рис. 9,*б*) слева от вертикальной оси изображен четырехполюсный двигатель, справа — двухполюсный.

Основными частями асинхронного двигателя являются статор (неподвижная часть) и ротор (вращающаяся часть), разделенные воздушным зазором, который с увеличением мощности двигателя возрастает от 0,1 до 0,35 мм. Сердечник *4* статора набирают из штампованных листов электротехнической стали марки 2013 толщиной 0,5 мм. Листы штампуют в виде колец, на внутренней стороне которых имеются пазы для размещения обмотки *3*. Для уменьшения потерь от вихревых токов листы статора перед сборкой в пакет изолируют. После сборки пакет охватывают скобами, которые приваривают к крайним листам электросваркой.

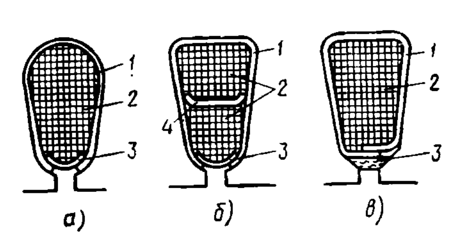


Рис. 10. Формы пазов статора:

1 — овальная, *б* — полуовальная, *в* — трапецеидальная; *1, 3* — пазовые изоляция и клин, *2* — проводники обмотки статора, *4* — межслойная прокладка

Пазы статора в машинах малой мощности выполняют полузакрытыми овальной, полуовальной или трапецеидальной формы (рис. 10, *а, б, в*).

При таких пазах зубцы статора имеют параллельные стенки и более равномерно нагружены магнитным потоком. Ширину прорези паза выбирают несколько больше диаметра обмоточного провода. Минимальную ширину прорези статорного листа определяют из условия технологичности укладки обмотки (она должна быть не менее 1,8 мм).

Перед укладкой обмотки каждый паз статора изолируют. Пазовую изоляцию выполняют преимущественно в виде коробочки из лавсановой пленки или пленкоэлектрокартона толщиной примерно 0,2 мм. В пазы статора укладывают секции двухслойной или однослойной обмотки. В первом случае слои разделяют электроизоляционной прокладкой *4*. Для обмоток статора обычно применяют медные круглые провода с эмалевой изоляцией ПЭВ-2 или ПЭТВ. Проводники обмотки закрепляют в пазах с помощью клиньев *3* из лавсана, электрокартона (рис. 10, *а, б*) или пластмассы (рис. 10,*в*).

В двигателях серии 4А использованы трапецеидальные пазы, а обмотка статора выполнена однослойной с концентрическими катушками. Намотку и укладку такой обмотки производят на статоронамоточных станках.

Обмотанный статор двигателя вставляют в предварительно нагретую станину *13* (см. рис. 9), отлитую из алюминиевого сплава. Для улучшения охлаждения увеличивают внешнюю поверхность двигателя, снабжая станину ребрами. Концы фаз обмотки статора выводят на зажимы коробки *5* выводов и обозначают начала фаз *С1, С2, С3*, а концы—*С4, С5, С6* (рис. 11, *а*). Зажимы располагают так, чтобы обмотку было удобно соединить в звезду (рис. 11,*б*) или треугольник (рис. 11,*в*).

Сердечник *6* ротора (см. рис. 9) АД представляет собой набранный из штампованных листов электротехнической стали цилиндрический пакет, на внешней поверхности которого имеются продольные пазы для обмотки. Листы сердечника ротора специально не изолируют, так как имеющаяся на их поверхности пленка окалины оказывается достаточной изоляцией.

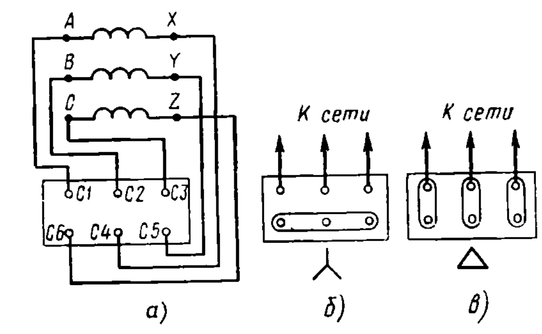


Рис. 11. Расположение выводов обмотки статора на щитке зажимов (*а*) и перемычек при соединении обмотки в звезду (*б*) и треугольник (*в*)

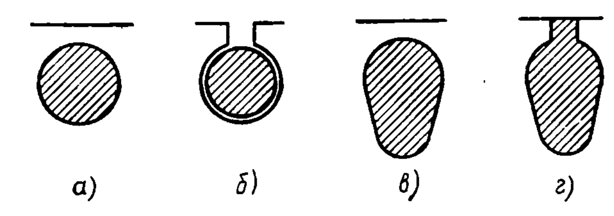


Рис. 12. Пазы ротора:
а, б — круглые, *в, г* — овальные

Пазы ротора в машинах малой мощности выполняют закрытыми (рис. 12, *а, в*) или полузакрытыми (рис. 12, *б, г*) круглой или овальной формы. В пазах ротора располагают алюминиевые (рис. 12, *а, в, г*) или медные (рис. 12,*б*) стержни, соединяющиеся между собой с торцов короткозамыкающими кольцами. Таким образом, короткозамкнутая обмотка ротора (рис. 13, *а*) имеет вид «беличьей клетки». В микродвигателях общепромышленного назначения такую обмотку обычно получают заливкой алюминия под давлением в овальные пазы ротора. Вместе со стержнями отливают и замыкающие кольца 2, которые снабжают выступами — вентиляционными лопатками для улучшения охлаждения (рис. 13,*б*).

В пакет ротора запрессовывают ступенчатый вал *1* (см. рис. 9) с накаткой в средней части и после обработки наружной поверхности пакета и посадочных шеек вала устанавливают подшипники качения *12*. Лишь в двигателях, от которых требуется бесшумная работа, применяют подшипники скольжения из бронзы или бронзографита. Собранный ротор помещают в расточку статора, затем устанавливают подшипниковые щиты.

Подшипниковые щиты *2* и *9* отливают под давлением из сплава алюминия. Боковые поверхности щитов снабжены ребрами для охлаждения и бобышками с отверстиями под стяжные болты *7* для крепления щитов к корпусу двигателя. Торцевые поверхности

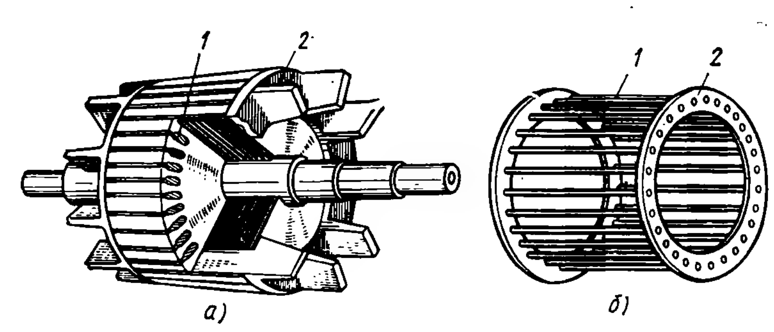


Рис. 13. Короткозамкнутый ротор (*а*) и его обмотка (*б*):
1 — стержни, *2* — короткозамыкающие кольца

щитов с внутренней стороны имеют несколько радиальных ребер жесткости. Для уменьшения износа щитов отверстия под подшипники армируют стальными втулками *11*. В двигателях серии 4А используют как фланцевое крепление, так и крепление на лапах *15*.

§ 6. Трехфазные обмотки статора

В трехфазных АД малой мощности обмотки статоров распределены по пазам сердечников. Распределенная обмотка состоит, как правило, из многовитковых катушек, изготовляемых из изолированного медного провода круглого сечения. В катушке различают (рис. 14) прямолинейные (пазовые) *3* и *5* и криволинейные (лобовые) *2* и *4* части. Начало *1* и конец *6* катушки называют ее *выводными концами*.

Расстояние y между пазовыми частями катушки является *шагом обмотки*. Шаг обмотки, равный полюсному делению ($y=\tau$; $\tau=\pi D/(2p)$, где D — внутренний диаметр статора), называют *диаметральным*, а шаг обмотки, меньший полюсного деления ($y<\tau$), — *укороченным*. На практике полюсное деление шаг обмотки чаще измеряют в зубцовых делениях: $\tau_Z=\tau/t_Z=Z_c/(2p)$, $y_Z=y/t_Z$, где $t_Z=\pi D/Z_c$ — зубцовое деление: Z_c — число пазов статора.

Обмотки статора выполняют одно- и двухслойными. В однослойных обмотках катушки располагают в пазах статора в один, а в двухслойных — в два слоя. Применение более сложных двухслойных обмоток с укороченным шагом приближает форму кривой мдс к синусоидальной и дает некоторую экономию обмоточного провода за счет сокращения длины ее лобовых частей.

Трехфазная обмотка АД состоит из трех совершенно одинаковых однофазных обмоток (фаз), каждая из которых может содержать несколько катушек. Чтобы обмотка была симметричной, фаза должна занимать Z_c/m_1 пазов (m_1 — число фаз). Обмотка статора может быть многополюсной, т. е. образовывать $2p$ полюсов, поэтому на каждом полюсном делении фаза должна занимать число пазов на полюс и фазу $q=Z_c/(2pm_1)$. Таким образом, число пазов статора трехфазного двигателя должно быть кратным шести ($Z_c=2p\cdot 3q=6pq$), а угол сдвига осей фаз в пространстве относительно друг друга — $360°/(pm_1)=120°/p$.

На рис. 15 показана развернутая схема трехфазной двухслойной равнокатушечной обмотки с укороченным шагом ($Z_c=18$, $2p=2$; $q=3$; $y_Z=7$), а на рис. 16 — схема трехфазной однослойной концентрической обмотки с диаметральным ша-

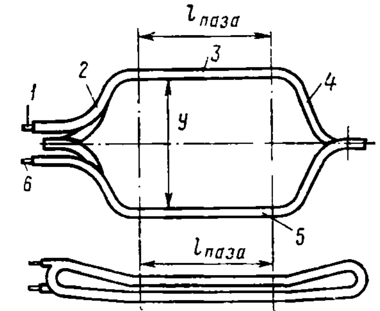


Рис. 14. Катушка распределенной обмотки статора:
1, 6 — начало и конец, *2, 4* — лобовые части, *3, 5* — пазовые части

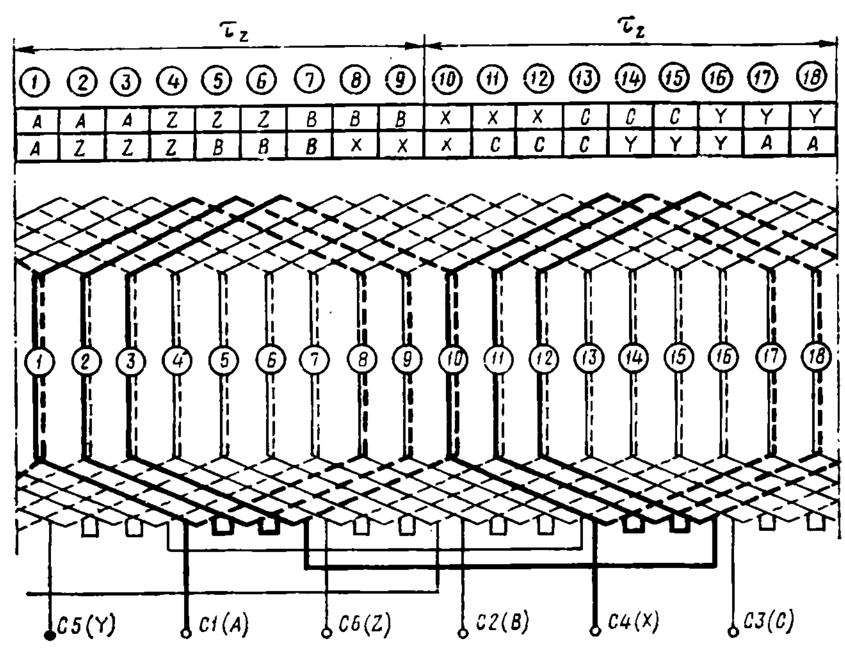


Рис. 15. Схема трехфазной двухслойной обмотки статора

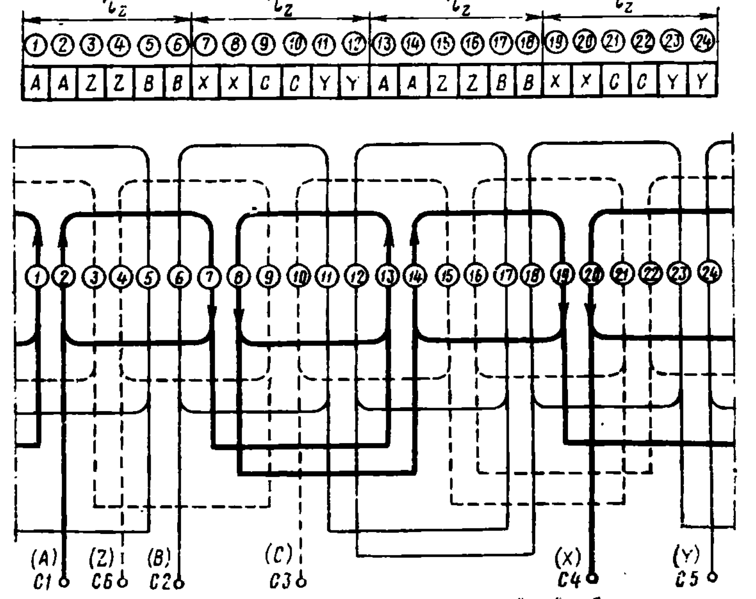


Рис. 16. Схема трехфазной однослойной обмотки статора

гом ($Z_c=24$; $2p=4$; $q=2$). Над схемами приведены таблицы расположения катушек в пазах статора. Из схем видно, что обе обмотки состоят из отдельных катушечных групп — катушек, лежащих в соседних пазах и принадлежащих одной фазе. Число катушечных групп в каждой фазе двухслойной обмотки равно числу полюсов, а в каждой фазе однослойной обмотки — числу пар полюсов, т. е. в 2 раза меньше. Каждая катушечная группа состоит из q катушек. Если число пазов на полюс и фазу $q=1$, обмотку называют сосредоточенной. Катушечные группы могут соединяться последовательно или параллельно. Число последовательно соединенных витков в фазе двухслойной обмотки $w_ф=2pqw_к/a$, а в фазе однослойной обмотки — $w_ф=pqw_к/a$ ($w_к$ — число витков в катушке; a — число параллельных ветвей в фазе).

Для получения синусоидально распределенного магнитного поля обмотку статора в машинах переменного тока обычно выполняют с числом пазов на полюс и фазу $q>1$. При этом амплитудные значения мдс соседних катушек смещены в пространстве на угол, соответствующий зубцовому делению $\alpha_Z=2\pi/Z_c=\pi/(pm_1q)$. Поэтому суммарная мдс фазы $F_ф$ равна не арифметической, а геометрической сумме мдс отдельных катушек. Отношение геометрической суммы мдс катушек к их арифметической сумме называется *обмоточным коэффициентом* k_w. Математически обмоточный коэффициент определяют произведением коэффициента распределения обмотки $k_р=\sin(q\alpha_Z/2)/[q\sin(\alpha_Z/2)]$ на коэффициент укорочения катушки $k_у=\sin[y\pi/(2\tau)]$: $k_w=k_рk_у$.

Произведение фактического числа витков фазы $w_ф$ на обмоточный коэффициент k_w называют *эффективным числом витков фазы*:

$$w_{ф.эф}=w_фk_w. \qquad (30)$$

Эффективное число витков $w_{ф.эф}$ — это число витков диаметральной сосредоточенной обмотки, которая по своим электромагнитным свойствам эквивалентна распределенной обмотке с числом витков $w_ф$. Таким образом, умножение $w_ф$ на k_w равносильно замене распределенной обмотки сосредоточенной, у которой $k_р=1$; $k_у=1$ и $k_w=1$. У распределенной обмотки обмоточный коэффициент $k_w<1$, поэтому $w_{ф.эф}<w_ф$.

§ 7. Магнитное поле трехфазной обмотки

Рассмотрим простейший статор двухполюсного ($2p=2$) трехфазного АД, обмотка которого образована тремя эквивалентными сосредоточенными катушками (фазами); оси катушек сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 120° (рис. 17). Как видно из рисунка, для образования симметричной трехфазной

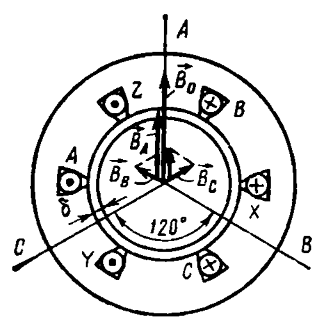


Рис. 17. Простейший статор трехфазного асинхронного двигателя

обмотки фазы должны иметь одно и то же число витков $w_{ф\cdot эф}$, занимать одинаковое число пазов и иметь определенное чередование фазных зон— *A, Z, B, X, C, У*.

При питании обмотки двигателя от трехфазной сети в фазах проходят синусоидальные токи, сдвинутые относительно друг друга во времени на треть периода:

$$I_A=\sqrt{2}I_1\sin\omega t;\ I_B=\sqrt{2}I_1\sin(\omega t-2\pi/3);$$
$$I_C=\sqrt{2}I_1\sin(\omega t+2\pi/3), \qquad (31)$$

где I_1 — действующее значение потребляемого тока, А.

Переменный ток, проходя по фазе, создает пульсирующую во времени и пространстве мдс (например, ток фазы A создает переменную мдс $F_A=I_Aw_{ф.эф}$, при этом мдс фазы образует пульсирующий магнитный поток ($\Phi_A=F_A/R_{м.ц}$). Если не учитывать насыщение стали, т. е. магнитные сопротивления сердечников статора и ротора, то согласно закону полного тока (5) магнитная индукция фазы

$$B_A=\mu_0F_A/(2\delta)=\mu_0I_Aw_{ф.эф}/(2\delta). \qquad (32)$$

Из этого выражения следует, что форма магнитного поля фазы в пространстве повторяет форму мдс и изменяется во времени с угловой частотой фазного тока $\omega=2\pi f_1$. При синусоидальном распределении мдс фаз магнитное поле каждой фазы изменяется в пространстве и во времени также по синусоидальному закону.

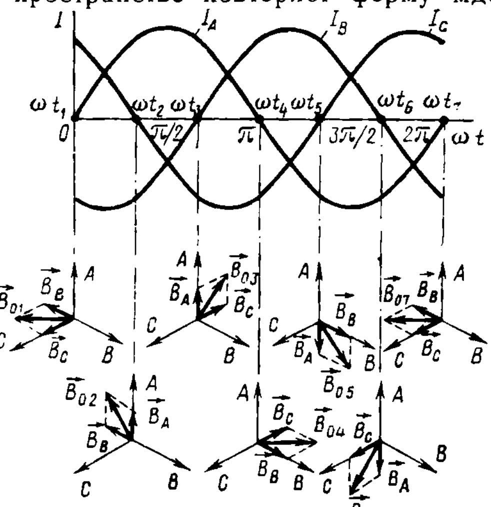


Рис. 18. Образование вращающегося магнитного поля в трехфазной машине переменного тока

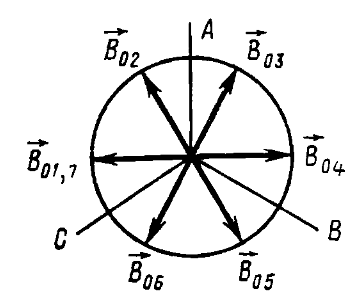


Рис. 19. Круговое вращающееся магнитное поле

Амплитудные значения пульсирующего магнитного поля фазы находятся на геометрической оси фазы, а направление и значение магнитной индукции определяются направлением и значением фазного тока.

Условимся за положительное направление магнитного поля (при положительном направлении тока от конца катушки к началу) считать направление, совпадающее с осью фазы. Магнитные поля фаз будем изображать амплитудами пространственных векторов индукции $\vec{B}_A$, $\vec{B}_B$, $\vec{B}_C$, а результирующее поле — вектором $\vec{B}_0$. На рис. 17 показаны направления магнитных полей для момента времени $\omega t=\pi/2$, когда ток в фазе A максимален ($I_A=\sqrt{2}I_1$), а токи в фазах B и C отрицательны ($I_B=I_C=-\sqrt{2}I_1/2$). Для других моментов времени направления векторов индукции фаз показаны на рис. 18.

Рассматривая магнитные поля в различные моменты времени (рис. 18), нетрудно заметить, что результирующий вектор индукции трехфазной обмотки непрерывно меняет свое направление — вращается. Значение же индукции вращающегося поля постоянно и равно $^3/_2$ от максимальной индукции пульсирующего поля любой из фаз:

$$B_0=(3/2)B_{A\max}=(3/2)\mu_0F_{A\max}/(2\delta). \qquad (33)$$

При вращении конец вектора $\vec{B}_0$ описывает окружность (рис. 19), поэтому такое поле называют *круговым*. Чтобы получить круговое вращающееся магнитное поле в трехфазной машине в общем случае, необходимо выполнить следующие условия: фазы обмотки должны быть сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол $120°/p$; токи в фазах должны быть сдвинуты во времени относительно друг друга на угол $2\pi/3$; мдс фаз должны быть равны между собой.

Частота вращения кругового поля зависит от частоты тока и числа полюсов. При двухполюсной обмотке ($2p=2$) поле делает полный оборот за один период изменения тока (см. рис. 18). При частоте переменного тока f_1 частота вращения поля $n_1=f_1$ (об/с) или $n_1=60f_1$ (об/мин). В общем случае за один период изменения переменного тока магнитное поле поворачивается в пространстве на угол, охватывающий пару полюсов. Таким образом, чем больше полюсов у обмотки статора, тем меньше пространственный угол поворота поля за один период переменного тока и, следовательно, меньше частота вращения поля статора (об/мин):

$$n_1=60f_1/p. \qquad (34)$$

При промышленной частоте тока $f_1=50$ Гц частота вращения поля статора может принимать значения, приведенные ниже:

Число полюсов $2p$	2	4	6	8	10	12
Частота вращения n, об/мин	3000	1500	1000	750	600	500

Если требуется частота вращения более 3000 об/мин, применяют АД, работающие от сети переменного тока повышенной частоты (400, 500, 1000 Гц). Асинхронные двигатели могут быть и двухскоростными. В этом случае в пазы статора укладывают либо две обмотки разной полюсности, либо одну полюснопереключаемую обмотку. Направление вращения магнитного поля статора определяется чередованием фаз. Вектор индукции $\vec{B}_0$ всегда вращается в сторону той фазы, которая питается отстающим током. Для изменения направления вращения поля на обратное достаточно поменять местами любые два провода, идущие от сети к двигателю.

§ 8. Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя

Круговое вращающееся магнитное поле может быть условно представлено полем полюсов постоянных магнитов, вращающихся с частотой n_1. Поместим в поле статора трехфазного асинхронного двигателя ротор с короткозамкнутой обмоткой (рис. 20). Вращающееся поле статора пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них эдс E_2. Направление эдс определяется правилом правой руки (необходимо учитывать, что движению поля по часовой стрелке соответствует относительное движение проводника против часовой стрелки). Так как обмотка ротора замкнута, то в ее проводниках возникают токи I_2. Ток каждого проводника ротора, взаимодействуя с полем статора, создает электромагнитную силу $F_{эм}$, направление которой определяется правилом левой руки. Совокупность электромагнитных сил создает электромагнитный момент $M_{эм}$, приводящий ротор во вращение с частотой n_2 в направлении вращающегося поля. Таким образом, электрическая энергия, поступающая из сети в обмотку статора, преобразуется в механическую энергию вращения ротора.

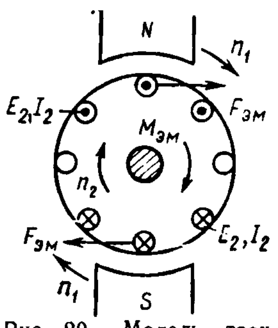


Рис. 20. Модель трехфазного асинхронного двигателя

Частота вращения ротора n_2 всегда меньше частоты вращения поля статора n_1, отсюда и название двигателя — асинхронный. Если бы ротор АД вращался с частотой n_1, поле статора не пересекало бы проводники обмотки ротора. Следовательно, в них не наводились бы эдс, не возникали токи, не создавался вращающий момент.

Разность между частотами вращения поля статора и ротора называют *частотой скольжения* $n_s = n_1 - n_2$. Именно с этой частотой поле статора пересекает проводники ротора. На практике чаще используют понятие *скольжения* — отношение частоты скольжения к частоте вращения поля статора:

$$s = (n_1 - n_2)/n_1. \quad (35)$$

Из этого выражения нетрудно найти связь частоты вращения ротора со скольжением:

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (36)$$

При работе АД частота вращения ротора может изменяться от $n_2 = 0$ ($s = 1$) при пуске двигателя до $n_2 = n_1$ ($s = 0$) при идеальном холостом ходе, когда $M_{эм} = M_в = 0$. Таким образом, двигательному режиму работы асинхронной машины соответствует диапазон изменения скольжения от 1 до 0. Частота вращения ротора, а следовательно, и скольжение зависят от нагрузки, т. е. внешнего момента сопротивления $M_в$ на валу двигателя. С увеличением нагрузки частота вращения ротора уменьшается, а скольжение возрастает. Частота вращения и скольжение, соответствующие номинальной нагрузке, называются *номинальными*. В асинхронных микродвигателях общего применения номинальное скольжение составляет $s_{ном} = 0{,}05 \div 0{,}10$, т. е. при номинальной нагрузке ротор АД вращается с частотой, близкой к частоте вращения поля.

Частота эдс и токов, наводимых в проводниках ротора, определяется частотой скольжения n_s: $f_2 = pn_s/60 = p(n_1 - n_2)n_1/(60n_1) = pn_1(n_1 - n_2)/(60n_1)$. Учитывая, что $pn_1/60 = f_1$, а $(n_1 - n_2)/n_1 = s$, определим

$$f_2 = f_1 s. \quad (37)$$

Из этого выражения видно, что в номинальном режиме ($s_{ном} = 0{,}05 \div 0{,}10$) при промышленной частоте ($f_1 = 50$ Гц) частота токов в роторе f_2 составляет всего 2,5—5 Гц. Таким образом, в рабочих режимах АД сердечник ротора подвергается значительно меньшему перемагничиванию, чем сердечник статора. Поэтому магнитные потери (потери на гистерезис и от вихревых токов) сосредоточены в основном в стали статора.

§ 9. Рабочие и механические хврактеристики

Для образования вращающего момента трехфазный АД потребляет из сети активную мощность

$$P_1 = 3U_{1ф}I_{1ф}\cos\varphi_1 = \sqrt{3}U_{1л}I_{1л}\cos\varphi_1, \quad (38)$$

где $U_{1ф}$, $I_{1ф}$ — действующие значения фазных напряжения и тока; $U_{1л} = U_с$, $I_{1л}$ — действующие значения линейных напряжения и тока. Вследствие электрических потерь в обмотке статора $P_{эл1} = 3I_{1ф}R_1$ (где R_1 — активное сопротивление фазы этой обмотки) и магнитных потерь в сердечнике статора $P_м$ на создание вращающего момента идет электромагнитная мощность

$$P_{эм} = P_1 - P_{эл1} - P_м. \quad (39)$$

Электромагнитный момент, соответствующий этой мощности,

$$M_{эм} = P_{эм}/\Omega_1, \quad (40)$$

где $\Omega_1 = 2\pi n_1/60$ — угловая скорость вращения магнитного поля.

Полная механическая мощность, развиваемая двигателем,

$$P'_2 = M_{эм}\Omega_2, \quad (41)$$

где $\Omega_2 = 2\pi n_2/60$ — угловая скорость вращения ротора — меньше электромагнитной мощности $P_{эм}$ на значение электрических потерь в обмотке ротора $P_{эл2}$:

$$P'_2 = P_{эм} - P_{эл2}. \quad (42)$$

Полезная механическая мощность на валу двигателя P_2 отличается от полной механической мощности P'_2 на величину механических потерь $P_{мех}$:

$$P_2 = P'_2 - P_{мех}. \quad (43)$$

Таким образом, полезная мощность P_2 меньше потребляемой двигателем мощности P_1 на сумму потерь ΣP:

$$P_2 = P_1 - \Sigma P = P_1 - P_{эл1} - P_м - P_{эл2} - P_{мех}. \quad (44)$$

Этому уравнению соответствует энергетическая диаграмма АД, показанная на рис. 21. Отношение полезной к потребляемой мощности определяет кпд двигателя

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + \Sigma P) = 1 - \Sigma P/P_1. \quad (45)$$

Используя уравнения (40), (41), (42) и выражение скольжения $s = (\Omega_1 - \Omega_2)/\Omega_1$, можно установить важные энергетические соотношения:

$$P'_2 = P_{эм}(1-s) \text{ и } P_{эл2} = P_{эм}s. \quad (46)$$

Из последнего выражения следует, что электрические потери в роторе пропорциональны скольжению, поэтому для повышения кпд двигателя стремятся уменьшить номинальное скольжение ротора.

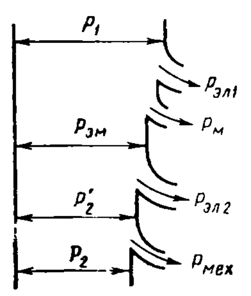


Рис. 21. Энергетическая диаграмма трехфазного асинхронного двигателя

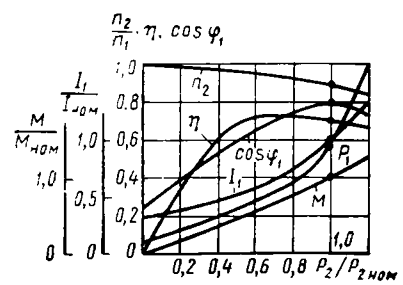


Рис. 22. Рабочие характеристики двигателя 4АА56В2

Оценку рабочих свойств асинхронных двигателей производят по *рабочим характеристикам* — зависимостям потребляемых тока I_1 и мощности P_1, вращающего момента M и частоты вращения n_2, коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и кпд η от полезной мощности на валу P_2 при постоянных номинальном напряжении питания $U_1 = U_{1ном}$ и частоте $f_1 = f_{1ном}$. В качестве примера на рис. 22 показаны рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя 4АА56В2.

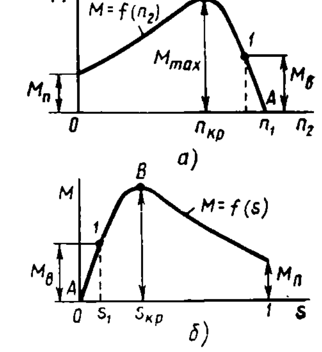


Рис. 23. Механические характеристики трехфазного асинхронного микродвигателя:

а — $M = f(n_2)$, *б* — $M = f(s)$

Вращающий момент АД образуется в результате взаимодействия магнитного потока Φ_1, созданного обмоткой статора, с наведенными им токами I_2 в обмотке ротора. Магнитный поток в машинах переменного тока пропорционален напряжению питания ($\Phi_1 \sim U_1$), следовательно, и ток ротора пропорционален приложенному напряжению ($I_2 \sim E_2 \sim \Phi_1 \sim U_1$). Отсюда следует вывод, что электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем, пропорционален квадрату напряжения сети ($M \sim U_1^2$). Это необходимо учитывать при работе АД от сетей с нестабильным напряжением, поскольку снижение напряжения даже на 10% номинального ($U_1 = 0{,}9U_{1ном}$) приводит к уменьшению момента на 19% ($M = 0{,}81M_{ном}$). С изменением нагрузки $M_в$ на валу двигателя изменяются частота вращения n_2, эдс E_2 и ток I_2 ротора, а следовательно, и электромагнитный момент M. Зависимость вращающего момента от частоты вращения ротора или скольжения при постоянном напряжении питания называется *механической характеристикой двигателя:* $M = f(n_2)$ или $M = f(s)$ при $U_1 = \text{const}$.

Различные виды механических характеристик трехфазного асинхронного микродвигателя показаны на рис. 23. Пусковые свойства АД характеризуются начальным пусковым моментом $M_п$ при неподвижном роторе ($n_2 = 0$; $s = 1$). У современных трехфазных АД малой мощности кратность пускового момента (отношение пускового момента к номинальному) обычно составляет: $k_п = M_п/M_{ном} = 1{,}5 \div 2{,}5$ при кратности пускового тока $k_I = I_п/I_{ном} = 3 \div 6$.

С увеличением частоты вращения ротора (уменьшением скольжения) момент двигателя возрастает и достигает максимального значения M_{max} при критической частоте вращения $n_{кр}$ (критическом скольжении $s_{кр}$). Отношение максимального момента к номинальному $k_м = M_{max}/M_{ном}$ характеризует *перегрузочную способность двигателя.* У современных двигателей $k_м = 1{,}8 \div 3{,}0$. При дальнейшем возрастании частоты вращения (уменьшении скольжения)

момент двигателя падает и при $n_2=n_1$ ($s=0$) становится равным нулю.

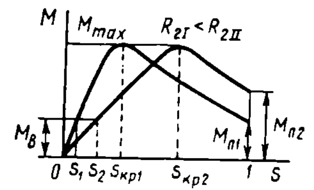


Рис. 24. Влияние активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя

При постоянной частоте вращения ротора рабочая точка *1* на механической характеристике определяется внешним моментом сопротивления $M_в$, при котором выполняется равенство $M_в=M$. В установившемся режиме ($n_2=\text{const}$) двигатель может устойчиво работать только на участке *А—В* механической характеристики. Поэтому зону двигательного режима от n_1 до $n_{кр}$ (от $s=0$ до $s_{кр}$) называют *зоной статически устойчивой работы* АД, а зону от $n_{кр}$ до $n_2=0$ (от $s_{кр}$ до $s=1$) — *зоной статически неустойчивой работы*. Последнюю зону двигатель проходит в процессе пуска. Местоположение максимального момента на механической характеристике, определяемое критическим скольжением, зависит в основном от соотношения параметров обмотки ротора. Критическое скольжение прямо пропорционально активному сопротивлению обмотки ротора R_2 ($s_{кр}\sim R_2$). Значение максимального момента не зависит от сопротивления R_2. Это означает, что с увеличением сопротивления R_2 механическая характеристика АД смещается в сторону больших скольжений (рис. 24). При этом возрастает начальный пусковой момент ($M_{п2}>M_{п1}$) и расширяется зона устойчивой работы двигателя ($s_{кр2}>s_{кр1}$)

При выполнении обмотки ротора с бо́льшим активным сопротивлением двигатель работает при том же внешнем моменте сопротивления с бо́льшим скольжением ($s_2>s_1$), что приводит согласно уравнению (46) к увеличению электрических потерь в роторе и снижению кпд двигателя.

В современных асинхронных микродвигателях $s_{кр}=0{,}2\div0{,}3$, т. е. зона устойчивой работы невелика.

Контрольные вопросы

1. Какие электрические машины называют асинхронными?
2. Как выражаются фазные напряжения (токи) через линейные при соединении обмоток звездой и треугольником?
3. Какие формы пазов применяют в асинхронных машинах?
4. Назовите типы трехфазных обмоток статора. Чему равен шаг обмотки?
5. Объясните процесс образования кругового магнитного поля.
6. От чего зависит частота вращения магнитного поля?
7. В каком диапазоне скольжений двигатель работает устойчиво?

ГЛАВА II. ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

§ 10. Общие сведения

Электрические машины, питающиеся от однофазной сети переменного тока, называют *однофазными*.

Наиболее распространены в промышленности, специализированной технике и бытовых электроприборах однофазные асинхронные двигатели малой мощности. Эти двигатели используют для привода электроинструментов, центрифуг и насосов, счетных и пишущих машин, аппаратов магнитной записи, вентиляторов и рукосушителей, холодильников и мясорубок, стиральных и моечных машин, медицинского и сельскохозяйственного оборудования.

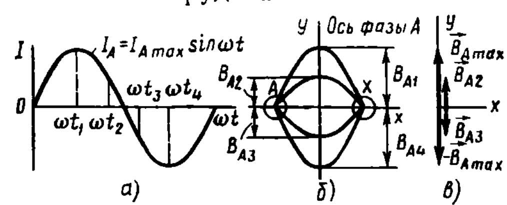


Рис. 25. Образование пульсирующего магнитного поля однофазной обмотки:
а — потребляемый ток, *б* — распределение поля, *в* — векторная диаграмма

Хотя асинхронные двигатели, питающиеся от однофазной сети, называют однофазными, их статор содержит обычно двух- или трехфазную обмотку. Это объясняется тем, что однофазная обмотка при питании ее переменным током создает не вращающееся, а пульсирующее магнитное поле. Такое поле характеризуется тем, что амплитудные значения магнитной индукции находятся на оси фазы *А—Х* и изменяются во времени от $+B_{Amax}$ до $-B_{Amax}$ с частотой питающего тока.

Существует теорема, согласно которой пульсирующее магнитное поле можно заменить двумя круговыми магнитными полями с амплитудами $B_{пр}=B_{обр}=B_{Amax}/2$, вращающимися в противоположные стороны с частотами $n_{пр}=-n_{обр}=60f_1/p=n_1$. Поле, вращающееся в сторону вращения ротора, называют *прямым*, а поле противоположного направления — *обратным* (рис. 25, *а, б, в*).

Скольжение ротора относительно прямого магнитного поля

$$s_{пр}=(n_{пр}-n_2)/n_{пр}=(n_1-n_2)/n_1=s. \quad (47)$$

Скольжение ротора относительно обратного магнитного поля

$$s_{обр}=(n_{обр}-n_2)/n_{обр}=(n_1+n_2/n_1=(n_1+n_2+n_1-n_1)/n_1= =[2n_1-(n_1-n_2)]/n_1=2-s. \quad (48)$$

Вращающиеся магнитные поля $B_{пр}$ и $B_{обр}$ наводят в короткозамкнутой обмотке ротора эдс $E_{2пр}$ и $E_{2обр}$, которые создают токи $I_{2пр}$ и $I_{2обр}$. Токи и эдс в обмотке ротора изменяются с частотами, пропорциональными скольжениям:

$$f_{пр}=f_1 s_{пр}=f_1 s;\ f_{2обр}=f_1 s_{обр}=f_1\,(2-s). \quad (49)$$

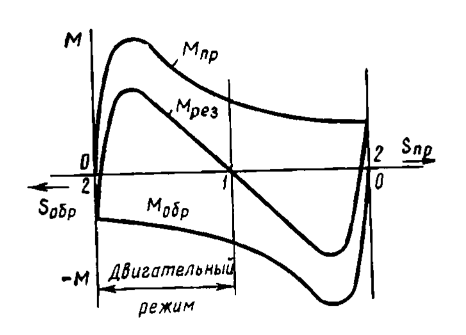


Рис. 26. Механическая характеристика асинхронного двигателя с однофазной обмоткой на статоре

В результате взаимодействия магнитных полей $B_{пр}$ и $B_{обр}$ с роторными токами $I_{2пр}$ и $I_{2обр}$ образуются вращающий $M_{пр}>0$ и тормозной $M_{обр}<0$ электромагнитные моменты. Результирующий электромагнитный момент равен алгебраической сумме моментов $M_{пр}$ и $M_{обр}$: $M_{рез}=M_{пр}+M_{обр}$.

На рис. 26 показана механическая характеристика асинхронного двигателя с однофазной обмоткой на статоре. Из рисунка видно, что такой двигатель не имеет начального пускового момента: $M_п=0$ при $s_{пр}=s_{обр}=1$ $(n_2=0)$. Для пуска двигателя необходимо привести ротор во вращение, приложив внешний момент. Естественно, что такой «чисто» однофазный двигатель не представляет практического интереса.

Чтобы асинхронный двигатель развил пусковой момент, магнитное поле, создаваемое обмоткой статора, должно быть не пульсирующим, а вращающимся. Для получения такого поля необходимо: расположить на статоре двухфазную обмотку $A—X$, $B—Y$, оси фаз которой сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол $0<\theta<180°/p$; запитать фазы токами, смещенными относительно друг друга во времени на угол $0<\gamma<\pi$.

Если сдвинуть фазы A и B двухфазной обмотки на угол $\theta=90°/p$, сместить токи в фазах I_A и I_B на угол $\gamma=\pi/2$ и выполнить условие равенства мдс фаз $F_A=F_B$ $(I_A w_{A\,эф}=I_B w_{B\,эф})$, то в двигателе образуется круговое вращающееся магнитное поле (рис. 27) $B_0=B_{A\max}=B_{B\max}=\mu_0 F_{A\max}/(2\delta)$. (50)

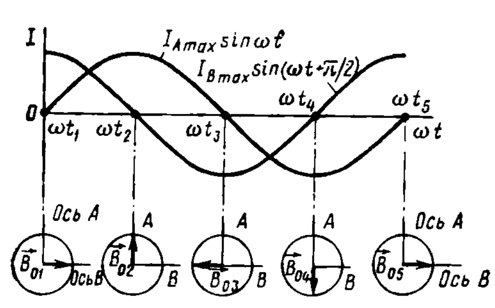


Рис. 27. Образование кругового вращающегося магнитного поля двухфазной системой токов

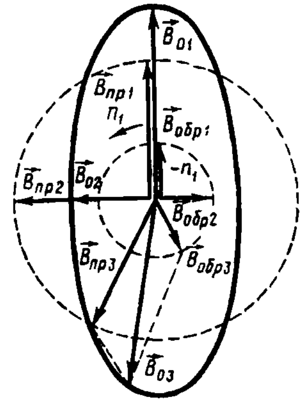


Рис. 28. Эллиптическое магнитное поле двухфазной системы токов

При несоблюдении хотя бы одного из указанных условий магнитное поле становится эллиптическим. Это поле отличается от кругового тем, что пространственный вектор магнитной индукции $\vec{B}_0$ при вращении описывает не окружность, а эллипс. Эллиптическое поле можно рассматривать как сумму двух неравных по величине вращающихся в разные стороны круговых магнитных полей: прямого $B_{пр}$ и обратного $B_{обр}$. На рис. 28 показано образование эллиптического поля двумя круговыми полями при $B_{пр}>B_{обр}$.

Хотя при эллиптическом поле и создается тормозной момент $M_{обр}$, однако во всем диапазоне скольжений двигательного режима $(0<s<1)$ выполняется неравенство $|M_{пр}|>|M_{обр}|$. Поэтому результирующий начальный пусковой момент отличается от нуля.

Сдвиг фаз в пространстве выполняют при укладке двухфазной обмотки в пазы статора. Для получения необходимого сдвига токов во времени в цепь одной из фаз включают фазосдвигающий элемент, в качестве которого используют либо активное сопротивление, либо емкость.

§ 11. Асинхронные двигатели с пусковыми элементами

В асинхронных двигателях с пусковыми элементами используют двухфазную обмотку статора с параллельным включением взаимно перпендикулярных рабочей A и пусковой B фаз. Фаза B включается в сеть только на период пуска. Для обеспечения временного сдвига тока I_B относительно тока I_A пусковая фаза может иметь либо повышенное активное сопротивление за счет выполнения ее проводом малого сечения (рис. 29,*а*), либо пусковой конденсатор (рис. 29,*б*).

Двигатели с повышенным активным сопротивлением в пусковой фазе широко применяют в бытовой технике. В качестве примера на рис. 30 показана конструкция двухполюсного двигателя ДХМ-2 мощностью 90 Вт, предназначенного для привода герметичного компрессора бытовых холодильников. Двигатели поставляются в разобранном виде и состоят из статора и ротора *1* (без вала). Сердечник *3* статора набран из листов электротехнической стали 2011 или 2013, имеющих пазы неодинаковой формы. Применение различной конфигурации пазов позволило снизить отход стали при штамповке. Однофазная распределенная обмотка *2*, образующая рабочую фазу, занимает $^2/_3$ пазов статора и размещена в пазах большего сечения; в пазах меньшего сечения уложена пусковая фаза. Концы рабочей фазы имеют маркировку *С1*, *С2*, пусковой — *П1*, *П2* и выведены на контактную колодку *4*. Ротор двигателя содержит короткозамкнутую обмотку, изготовленную из алюминия методом литья под давлением. Двигатель имеет открытое исполнение и предназначен для работы в среде фреона и охлаждающих масел.

Применение в качестве фазосмещающего элемента активного сопротивления не позволяет получить угол сдвига между токами I_A и I_B, близкий к 90°. Поэтому в двигателях с повышенным активным сопротивлением пусковой обмотки магнитное поле резко эллиптическое, чем объясняются низкие пусковые свойства таких двигателей, у которых кратность пускового момента мала $k_п = M_п/M_{ном} = 0{,}8 \div 1{,}2$, а кратность пускового тока велика $k_I = I_п/I_{ном} = 5 \div 9$.

При необходимости получения большего пускового момента в качестве фазосмещающего элемента используют конденсатор, что позволяет увеличить угол сдвига между токами I_A и I_B, приблизить форму магнитного поля к круговому и повысить кратность пускового момента до $k_п = 1{,}5 \div 2$. В современных однофазных АД емкость пускового конденсатора составляет $1 \div 2$ мкФ на 10 Вт полезной мощности.

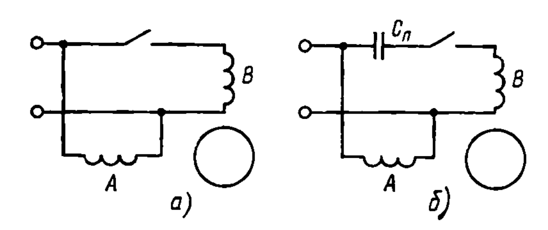


Рис. 29. Схемы включения однофазного АД с повышенным активным сопротивлением пусковой фазы (*а*) и с пусковым конденсатором (*б*)

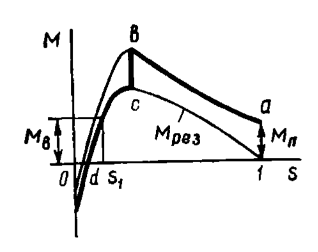


Рис. 31. Механическая характеристика однофазного АД с пусковыми элементами

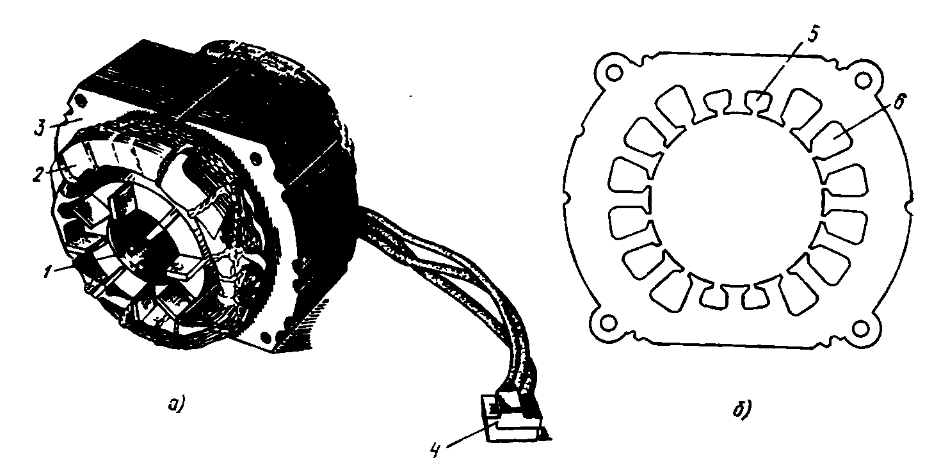


Рис. 30. Общий вид (*а*) и лист статора (*б*) однофазного асинхронного двигателя ДХМ-2:

1 — короткозамкнутый ротор, *2, 3* — обмотка и сердечник статора, *4* — контактная колодка, *5, 6* — пазы для пусковой и рабочей обмоток

На рис. 31 показана механическая характеристика однофазного АД с пусковыми элементами. В процессе разгона ротора двигатель работает как двухфазный (участок *ab*). После достижения ротором частоты вращения $n_2 = (0{,}7 \div 0{,}8)n_1$ (точка *b*) пусковая фаза отключается с помощью специального реле и двигатель продолжает работать как однофазный (участок *cd*) со скольжением s_1, при котором результирующий вращающий момент $M_{рез}$ уравновешивает внешний момент сопротивления $M_в$. Поскольку и в рабочем режиме электромагнитный момент содержит кроме вращающего $M_{пр}$ тормозной момент $M_{обр}$, рабочие свойства у однофазных АД значительно ниже, чем у трехфазных. Номинальный момент однофазных АД составляет всего 40—50% номинального момента трехфазных АД при одинаковых объемах активных материалов.

§ 12. Конденсаторные асинхронные двигатели

Конденсаторные АД имеют на статоре двухфазную обмотку, состоящую из главной *A* и вспомогательной *B* фаз. Обе фазы занимают одинаковое число пазов и сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол $90°/p$. В общем случае фазы имеют различные числа витков. Главная фаза подключается непосредственно к однофазной сети переменного тока, вспомогательная — через рабочий конденсатор $C_р$ (рис. 32). В отличие от двигателей с пусковыми элементами в конденсаторных двигателях вспомогательная фаза остается подключенной к сети как при пуске, так и при работе.

Большинство конденсаторных АД (серий АВЕ, КД и др.) имеет распределенную обмотку статора. На рис. 33 показана конструкция четырехполюсного двигателя типа КДР мощностью 6 Вт, предназначенного для привода бытовой звукозаписывающей аппаратуры. Сердечники *1* (статора) и *3* (ротора) выполнены в виде цилиндрических пакетов, набранных из электротехнической стали. В пазах статора уложена однослойная катушечная обмотка *2*. Короткозамкнутая обмотка *8* ротора изготовлена заливкой пазов алюминием под давлением. На обоих торцах замыкающих колец отлиты лопатки для вентиляции. Сердечник ротора напрессован на вал *6*, входящий в металлокерамические самоустанавливающиеся подшипники скольжения *4*. Последние закреплены в подшипниковых щитах *5* и *9*, отлитых из сплава алюминия. Для засасывания холодного воздуха и выхода нагретого в торцевых и цилиндрических поверхностях подшипниковых щитов выполнены отверстия.

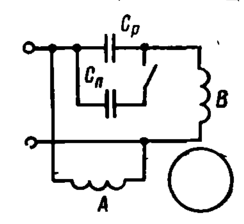
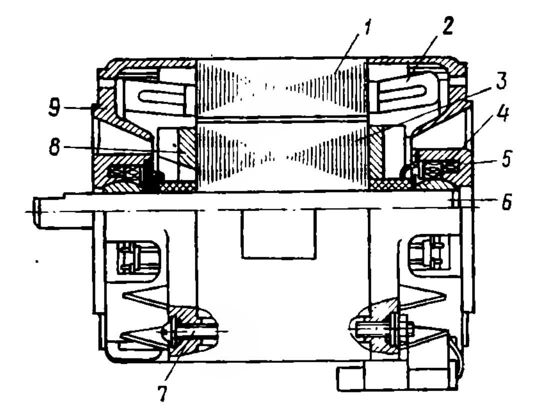
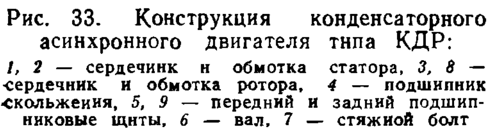


Рис. 32. Схема включения конденсаторного асинхронного двигателя

Таким образом, двигатель имеет открытое исполнение с самовентиляцией, но не имеет




Рис. 33. Конструкция конденсаторного асинхронного двигателя типа КДР:

1, 2 — сердечник и обмотка статора, *3, 8* — сердечник и обмотка ротора, *4* — подшипник скольжения, *5, 9* — передний и задний подшипниковые щиты, *6* — вал, *7* — стяжной болт

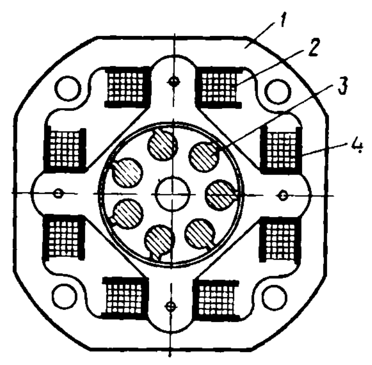


Рис. 34. Схема явнополюсного конденсаторного АД:

1, 2 — сердечник и обмотка статора, *3* — короткозамкнутый ротор, *4* — вспомогательная фаза

корпуса; жесткость его обеспечивается болтами *7*, стягивающими передний и задний подшипниковые щиты, надеваемые на сердечник статора. Крепление двигателя фланцевое.

В последние годы все чаще применяют явнополюсную конструкцию конденсаторного АД (серий КД, ДКВ) с разъемным сердечником *1* и с сосредоточенной обмоткой *2* статора (рис. 34). Такие двигатели просты в изготовлении, дешевле, но имеют большие габариты и массу, меньшие энергетические показатели, чем двигатели с распределенной обмоткой. Поэтому их применяют при малых мощностях (примерно до $P_{2ном}=25$ Вт).

Рабочую емкость в конденсаторных АД выбирают, как правило, исходя из условий получения кругового вращающегося поля в номинальном режиме. Емкость конденсатора (мкФ), обеспечивающую смещение токов в фазах на угол $\gamma=\pi/2$, можно определить по формуле

$$C_р=3\,180 I_{A\,ном}\cos\varphi_{A\,ном}\ /(U_{A\,ном}k), \qquad (51)$$

где $U_{A\,ном}$, $I_{A\,ном}$, $\cos\varphi_{A\,ном}$ — номинальные напряжение, ток и коэффициент мощности главной фазы; $k=w_{B\,эф}/w_{A\,эф}$ — коэффициент трансформации (отношение эффективных чисел витков вспомогательной и главной фаз).

Таким образом, если асинхронные двигатели с пусковыми элементами по окончании процесса пуска работают с пульсирующим магнитным полем статора, то конденсаторные двигатели работают с вращающимся полем, близким к круговому. Поэтому однофазные конденсаторные двигатели в номинальном режиме приближаются по своим свойствам к трехфазным двигателям.

При отклонении режима работы от номинального магнитное поле становится эллиптическим и рабочие свойства двигателя ухудшаются. Наибольшее отличие магнитного поля от кругового наблюдается при пуске. Поэтому конденсаторные АД с рабочей емкостью имеют малую кратность пускового момента $k_п=M_п/M_{ном}=0{,}4\div0{,}6$ и применяются лишь в устройствах, где начальный момент нагрузки невелик.

Пусковой момент конденсаторного двигателя может быть значительно повышен, если параллельно рабочему конденсатору включить пусковой конденсатор (см. рис. 32). Конденсатор $C_п$ включают лишь на время запуска двигателя, и при достижении ротором частоты вращения $n_2=(0{,}7\div0{,}8)n_1$ он должен отключаться. Пусковая емкость, обеспечивающая кратность пускового момента $k_п=2\div3$, в несколько раз превышает рабочую емкость ($C_п>C_р$). При выборе конденсатора необходимо следить, чтобы рабочее напряжение, указанное на нем, было не меньше напряжения $U_к=U_{A\,ном}\sqrt{1+k^2}$.

§ 13. Универсальные асинхронные двигатели

Трехфазные АД, предназначенные для работы как от однофазной, так и трехфазной сети переменного тока, называют *универсальными асинхронными двигателями*. Любой трехфазный АД может быть использован для работы от однофазной сети. Однако лишь специально спроектированные двигатели имеют хорошие пусковые и рабочие характеристики при одно- и трехфазном пита-

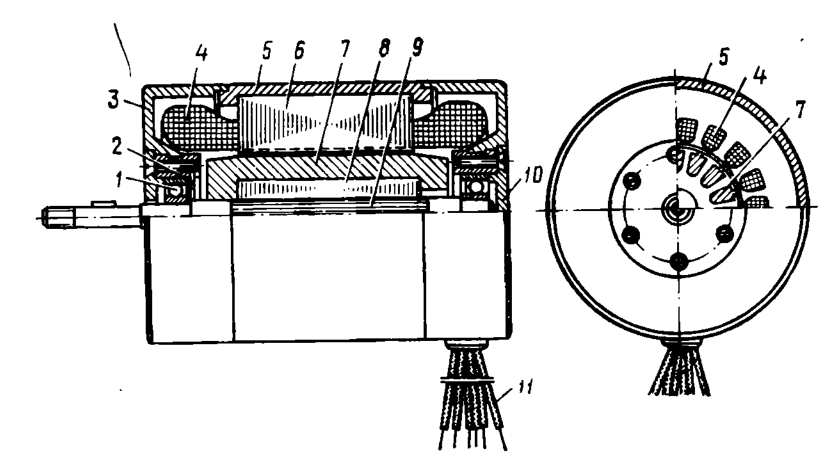


Рис. 35. Конструкция асинхронного двигателя серии УАД:

1 — шарикоподшипник, *2* — втулка, *3* — подшипниковый щит, *4, 6* — обмотка и сердечник статора, *5* — корпус, *7, 8* — обмотка и сердечник ротора, *9* — вал, *10* — крышка подшипника, *11* — выводные концы

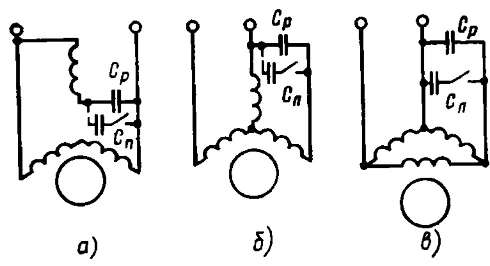


Рис. 36. Схемы включения трехфазных АД в однофазную сеть:
а — последовательно-параллельная, *б* — в звезду, *в* — в треугольник

ии. В СССР выпускают универсальные двух- и четырехполюсные асинхроные микродвигатели серии УАД мощностью от 1 до 70 Вт.

Устройство асинхроиного двигателя серии УАД показано иа рис. 35. Двигатель имеет закрытое исполнение. Сердечники *6* (статора) и *8* (ротора) набраны из листов электротехнической стали 1411 толщиной 0,35 мм. Перед укладкой обмотки статор заливают под давлением алюминиевым сплавом, образующим корпус *5*. Обмотка *4* статора распределенная двухслойная с укороченным шагом. Воздушный зазор между статором и ротором составляет 0,15 мм. Ротор с алюминиевой короткозамкнутой обмоткой *7* напрессован на вал *9* из коррозионно-стойкой стали. Подшипниковые щиты *3* отлиты под давлением из алюминиевого сплава. Посадочные места шарикоподшипников *1* армированы втулкой *2* из нержавеющей стали. Доступ к подшипникам обеспечивается съемными крышками *10*. Щиты крепят к корпусу клеем на эпоксидной основе.

В двигателях серии УАД узлы и детали изготовлены с высокой точностью, поэтому эти двигатели используют в основном в автоматических устройствах.

Наиболее распространенные схемы включения трехфазных двигателей в однофазную сеть показаны на рис. 36,*а*—*в*. В двигателях серии УАД используют схемы, приведенные на рис. 36, *а*, *б*.

Емкость рабочего конденсатора (мкФ) для схемы, показанной на рис. 36,*а*,

$$C_р = 2\,400 I_{ном}/(U_{ном}\cos\varphi_{ном}), \quad (52)$$

а для схемы, показанной на рис. 36, *б*, *в*,

$$C_р = 2750 I_{ном}/U_{ном}\sqrt{1-\cos\varphi_{ном}}, \quad (53)$$

где $U_{ном}$, $I_{ном}$, $\cos\varphi_{ном}$ — линейные напряжеиие и ток, коэффициент мощности трехфазного двигателя в номинальном режиме.

§ 14. Асинхронные двигатели с экранированными полюсами

Конструктивные схемы статоров наиболее распространенных однофазных асинхронных двигателей с экраиированными полюсами показаны на рис. 37, а конструкция двухполюсного двигателя ДВ-2 для привода вентилятора — на рис. 38.

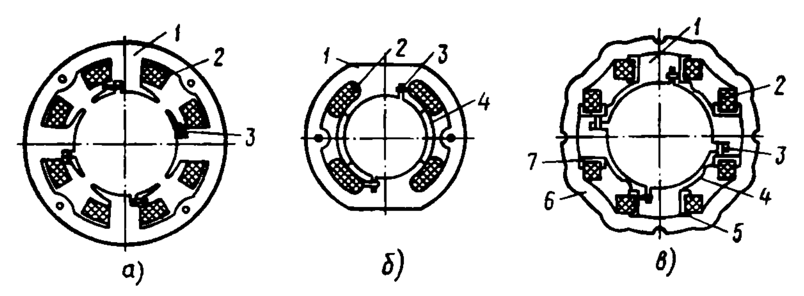


Рис. 37. Схемы статоров АД с экранированными полюсами:
а — без магнитного шунта, *б* — с магнитным шунтом, *в* — со сборным статором; *1, 2, 6* — сердечник, обмотка и ярмо статора, *3* — короткозамкнутый виток, *4* — магнитный шунт, *5* — крестовина, *7* — пластмассовый каркас

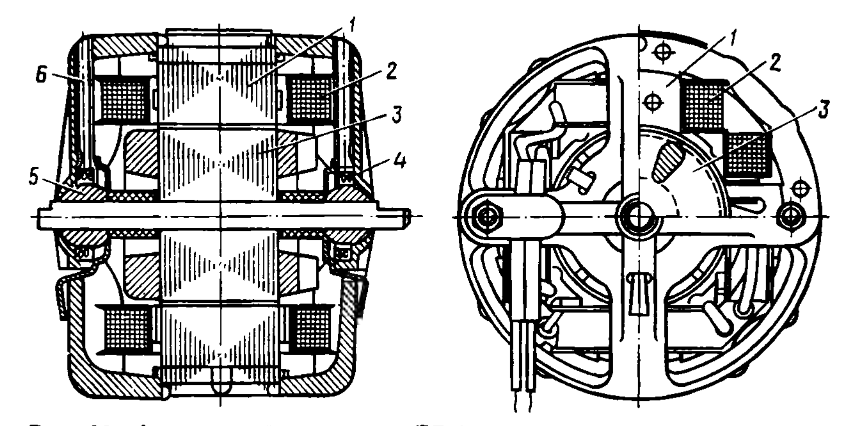


Рис. 38. Асинхронный двигатель ДВ-2 с экранированными полюсами:
1, 2 — сердечник и обмотка статора, *3* — короткозамкнутый ротор, *4* — подшипниковый щит, *5* — подшипник скольжения, *6* — канал для смазки

Шихтованный сердечник статора *1* с явновыраженными полюсами может быть иеразъемным (рис. 37,*а*, *б*) или сборным, состоящим из крестовины *5* и ярма *6* (рис. 37,*в*). На полюсах статора размещена однофазиая обмотка *2*, выполненная в виде последовательно соединенных катушек с внешней изоляцией. Иногда катушки располагают на пластмассовом каркасе *7*. Обмотку статора подключают к однофазной сети переменного тока.

Каждый полюс двигателя разделен продольным пазом на две неравные части. Меньшая часть полюса, составляющая обычно $^1/_5$—$^1/_3$ полюсиой дуги, охвачеиа медным или алюминиевым короткозамкнутым витком *3*, образующим магнитный экран. Часто между явновыражеиными полюсами статора располагают магнитные шунты *4*, выполняемые либо вставными из стали одинакового сечения (рис. 37,*б*), либо вместе с полюсами в виде единой кресто-

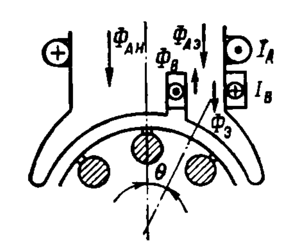


Рис. 39. К принципу действия АД с экранированными полюсами

вины из листов электротехнической стали (рис. 37, *в*). Магнитные шунты приближают форму распределения магнитного поля в воздушном зазоре к синусоидальной.

В двигателях с экранированными полюсами применяют обычный короткозамкнутый ротор *3* (рис. 38) с алюминиевой обмоткой. Подшипниковые щиты *4* отливают из сплава алюмииия, выполняя в торцах вентиляционные отверстия (окна), а в ребрах жесткости — радиальные каналы *6* для смазки сферических самоустанавливающихся подшипников скольжения *5*. Подшипниковые щиты стягивают болтами. При монтаже двигатель закрепляют хомутиком.

В двигателях с экранированными полюсами короткозамкнутый виток является вспомогательной фазой *B*, а обмотка, охватывающая полюсы,— главной фазой *A*, причем оси главной и вспомогательной фаз сдвинуты в пространстве на угол $\theta<90°$ (рис. 39). При включении однофазной обмотки статора в сеть в ней проходит переменный ток I_A, создающий пульсирующий магнитный поток Φ_A. Часть этого потока $\Phi_{Aэ}$ проходит по экранированной части полюса и наводит в короткозамкнутом витке эдс E_B и ток I_B.

Переменный ток I_B создает пульсирующий поток Φ_B, препятствующий, согласно правилу Ленца, прохождению потока $\Phi_{Aэ}$. Вследствие этого результирующий поток в экранированной части полюса $\Phi_э=\Phi_{Aэ}-\Phi_B$ достигает максимального значения позже, чем поток в неэкранированной части $\Phi_{Aн}$.

Таким образом, в двигателе с экранированными полюсами каждый полюс создает два магнитных потока $\Phi_{Aн}$ и $\Phi_э$, сдвинутых в пространстве на угол θ и смещенных во времени на некоторый угол γ. Поскольку углы θ и γ не равны 90° и $\Phi_{Aн}\neq\Phi_э$, в двигателе образуется вращающееся эллиптическое магнитное поле, которое всегда вращается в сторону отстающего потока, т. е. в сторону экранированной части полюса. Поэтому двигатели с короткозамкнутым витком на полюсе нереверсивны.

Из-за большой эллиптичности магнитного поля АД с экранированными полюсами обладают малой кратностью пускового момента $k_п=M_п/M_{ном}=0{,}4\div0{,}6$ и низкими энергетическими показателями $\eta=10\div40$ %, $\cos\varphi_A=0{,}4\div0{,}6$.

Достоинствами двигателей с экранированными полюсами являются: простота и технологичность конструкции, высокая надежность и малая стоимость. Эти качества и обусловили широкое применение двигателей в приводах с легкими условиями пуска (в лентопротяжных механизмах, вентиляторах, бытовых электроприборах и т. п.).

Контрольные вопросы

1. Какое магнитное поле создает катушка, обтекаемая переменным током?
2. Назовите условия образования вращающегося магнитного поля.
3. Какие моменты создаются в однофазном двигателе?
4. Сравните двигатели с различными фазосмещающими элементами.
5. Каково назначение магнитных шунтов в двигателе с экранированными полюсами?
6. Объясните образованне тормозного момента в однофазном двигателе.

ГЛАВА III. СИНХРОННЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

§ 15. Общие сведения

Электрические машины, у которых ротор вращается с частотой n_2, равной частоте вращения магнитного поля n_1, созданного обмоткой переменного тока ($n_2=n_1$), называют *синхронными двигателями.*

Вращающееся магнитное поле в синхронных двигателях образуется так же, как в асинхронных двигателях: сдвинутыми во времени переменными токами, которые проходят по фазам, смещенным в пространстве. Поэтому конструкции статоров синхронных и асинхронных микродвигателей принципиально не отличаются друг от друга.

В зависимости от конструкции роторов и принципа действия синхронные микродвигатели можно разделить на три основные группы: синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ), синхронные реактивные двигатели (СРД) и синхронные гистерезисные двигатели (СГД). Синхронные микродвигатели с электромагнитным возбуждением не нашли широкого применения из-за наличия скользящих контактов. Характерная особенность синхронных двигателей — постоянство частоты вращения ротора при постоянной частоте тока питающей сети f_1:

$$n_2=n_1=60f_1/p. \tag{54}$$

Частоту вращения магнитного поля n_1 называют *синхронной.* Из выражения (54) видно, что частота вращения ротора синхронного двигателя зависит от его полюсности и частоты переменного тока. Поэтому синхронные микродвигатели используют там, где требуется обеспечить синхронную работу механизмов и постоянство частоты вращения отдельных элементов системы при изменении нагрузки на валу и колебаниях напряжения питания.

Синхронные двигатели малой мощности широко применяют в системах звуко- и видеозаписи, фототелеграфии и связи, в качестве электропривода различного рода лентопротяжных механизмов, в навигационных приборах. Применение того или иного типа синхронного микродвигателя зависит от его достоинств и недостатков.

Синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов имеют следующие достоинства: хорошие энергетические показатели ($\cos\varphi$, η), высокую перегрузочную способность, наилучшую стабильность частоты вращения в пределах одного оборота. К их недостаткам относят большую кратность пускового тока, относительно высокую стоимость из-за наличия дорогостоящих постоянных магнитов и значительную зависимость синхронизирующих свойств от момента инерции нагрузки.

Синхронные реактивные двигатели имеют более низкие энергетические показатели, чем СДПМ, но проще по конструкции, технологичны в производстве и дешевле.

Существенный недостаток СДПМ и СРД — отсутствие у них пускового момента. Инерционность ротора и связанного с ним рабочего механизма не позволяет двигателю сразу развить частоту вращения, равную частоте вращения магнитного поля, которая устанавливается, как только в обмотке статора появляется ток. При неподвижном роторе полюсы магнитного поля статора перемещаются относительно полюсов ротора. В результате образуется знакопеременный момент, среднее значение которого равно нулю. Для пуска СДПМ и СРД необходимо предварительно либо уменьшить частоту вращения магнитного поля статора (частоту переменного тока), либо привести ротор во вращение с частотой, близкой к синхронной. При медленном перемещении поля статора относительно ротора последний успевает втянуться в синхронизм, т. е. достигнуть частоты вращения магнитного поля.

В первом случае для пуска двигателей необходим преобразователь с плавно регулируемой частотой тока от $f_1=3\div5$ Гц до $f_1=f_{1\,ном}$. Во втором случае применяют пусковое устройство. На практике в качестве пускового устройства обычно используют короткозамкнутую клетку, аналогичную обмотке ротора асинхронного двигателя. Такой способ пуска, называемый *асинхронным пуском*, получил широкое распространение.

Синхронные гистерезисные двигатели из-за особенностей образования вращающего момента не требуют пусковых устройств. Они имеют относительно большой пусковой момент и плавно втягиваются в синхронизм при любых моментах инерции нагрузки. Недостатками СГД являются низкий коэффициент мощности и невысокая стабильность частоты вращения в пределах одного оборота. Другие достоинства и недостатки синхронных микродвигателей будут рассмотрены при описании их устройства и принципа действия.

§ 16. Синхронные двигатели с постоянными магнитами

Конструкция СДПМ. Статор синхронного двигателя с постоянными магнитами практически не отличается от статора асинхронных двигателей малой мощности. Сердечник статора СДПМ на-

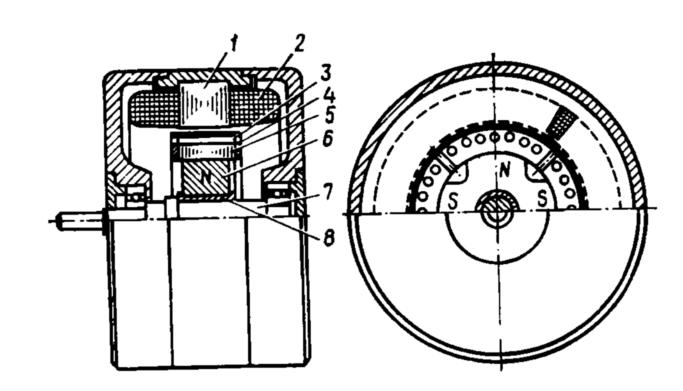


Рис. 40. Синхронный двигатель с радиальным расположением постоянных магнитов и короткозамкнутой обмотки:

1, 2 — сердечник и обмотка статора, *3* — стержни пусковой обмотки, *4* — короткозамыкающие кольца, *5* — сердечник ротора, *6* — постоянные магниты, *7* — вал, *8* — втулка

бирают из изолированных листов электротехнической стали. В пазах статора располагают двухполюсные или многополюсные трехфазные либо двухфазные обмотки. При питании от однофазной сети к обмоткам подключают фазосдвигающие элементы, чаще конденсаторы.

Характерной особенностью СДПМ является наличие на роторе особого источника постоянного магнитного поля — постоянных магнитов. Постоянные магниты — это предварительно намагниченные магнитно-твердые материалы, которые характеризуются высокими значениями остаточной магнитной индукции $B_r=0{,}3\div1{,}2$ Тл и коэрцитивной силы $H_c>40$ кА/м. Изготовляют их из сплавов, содержащих железо, алюминий, никель, кобальт (марки ЮНДК), и из порошкового оксидированного железа (ферриты).

В зависимости от взаимного расположения на роторе постоянных магнитов и короткозамкнутой пусковой обмотки различают радиальную и аксиальную конструкции СДПМ.

В двигателях *радиальной конструкции* (рис. 40) сердечник *5* ротора с короткозамкнутой обмоткой напрессован на постоянные магниты. Сердечник выполняют из листов электротехнической стали. В пазах пакета ротора размещают медные стержни *3* пусковой обмотки, концы которых припаивают к медным короткозамыкающим кольцам *4*. Чтобы поток постоянных магнитов не замыкался внутри роторного кольца, а проходил через воздушный зазор в статор, в междуполюсной зоне пакета ротора выполняют прорези, разделяющие полюсы разной полярности.

Постоянные магниты *6* могут быть цилиндрической, призматической или звездообразной формы. Магнитно-твердые материалы,

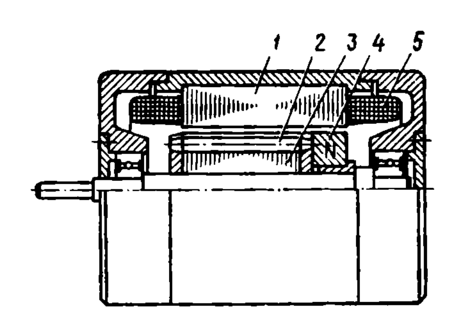


Рис. 41. Синхронный двигатель с аксиальным расположением постоянных магнитов и короткозамкнутой обмотки:

1, 5 — сердечник и обмотка статора, *2, 3* — короткозамкнутая обмотка и сердечник ротора, *4* — постоянные магниты

как правило, очень хрупки, поэтому единственным способом их обработки является шлифование отлитых поверхностей. По этой же причине магниты напрессовывают на вал с помощью алюминиевой втулки *8*.

Аксиальную конструкцию СДПМ (рис. 41) применяют при ограниченном внешнем диаметре двигателя, когда выполнение лучшей в электромагнитном отношении радиальной конструкции затруднительно. В аксиальной конструкции сердечник *3* ротора с короткозамкнутой обмоткой *2* напрессовывают непосредственно на вал, а постоянные магниты *4* устанавливают с торца пусковой обмотки. Короткозамкнутую обмотку ротора в двигателях такой конструкции выполняют как медной, так и алюминиевой.

Таким образом, СДПМ сочетают в себе как элементы синхронных машин — систему возбуждения (постоянные магниты), так и элементы асинхронных машин — короткозамкнутую обмотку, выполненную в виде «беличьей клетки».

Принцип действия СДПМ. Пуск синхронных двигателей с постоянными магнитами обычно осуществляют непосредственным включением обмотки статора в сеть. Статорные токи I_1, изменяющиеся с частотой сети f_1, создают вращающееся магнитное поле B_1, которое наводит в короткозамкнутой обмотке ротора эдс E_2 и токи I_2 частоты $f_2=f_1s$. В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля с токами пусковой обмотки образуется асинхронный вращающий момент $M_{ас}$, под действием которого ротор двигателя разгоняется до угловой скорости, близкой к синхронной.

В процессе разгона двигателя поле постоянных магнитов $B_м$ пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в них эдс $E_м$, изменяющуюся с переменной частотой $f_м$, пропорциональной частоте вращения ротора n_2. С учетом уравнения (36)

$$f_м=pn_2/60=pn_1(1-s)/60=f_1(1-s). \qquad (55)$$

Из этого выражения видно, что при неподвижном роторе ($s=1$) частота $f_м=0$ и, следовательно, поле постоянных магнитов не наводит в обмотке статора никакой эдс ($E_м=0$). По мере разгона двигателя частота $f_м$ возрастает и при синхронизме ($n_2=n_1$; $s=0$) становится равной частоте сети ($f_м=f_1$).

Под действием эдс $E_м$ в цепи обмотка статора — источник питания — проходят переменные токи $I_м$, которые, взаимодействуя с полем постоянных магнитов, создают тормозной момент $M_т<0$.

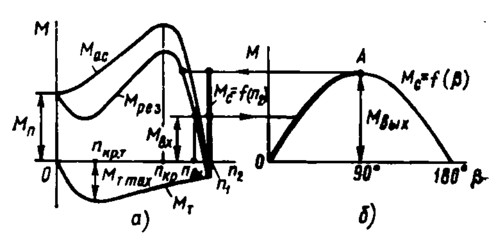


Рис. 42. Механическая (*а*) и угловая (*б*) характеристики СДПМ

Таким образом, физическая причина возникновения моментов $M_{ас}$ и $M_т$ одинакова, однако характер изменения их от частоты вращения ротора n_2 различный (рис. 42, *а*). Если максимум асинхронного момента $M_{ас}$, как и в обычном асинхронном двигателе, находится в области больших частот вращения $n_{кр}>0$ (малых скольжений $s_{кр}<1$), то максимум тормозного момента $M_т$ имеет место при малых частотах вращения $n_{кр.т}<n_1$ (больших значениях s). Поэтому зависимость результирующего пускового момента $M_{рез}=M_{ас}+M_т$ от скольжения s имеет провал в области малых частот вращения.

При достижении ротором подсинхронной частоты вращения ($n_2\approx 0{,}95n_1$) поле постоянных магнитов $B_м$, взаимодействуя с токами статора I_1, создает синхронизирующий момент M_c, под действием которого ротор «скачком» входит в синхронизм, т. е. достигает синхронной частоты вращения n_1. Наибольшее значение момента сопротивления (нагрузки), которое двигатель способен втянуть в синхронизм, называется *моментом входа в синхронизм* $M_{вх}$; соответствующую ему подсинхронную частоту вращения ротора обозначают $n_{вх}$.

Поскольку после вхождения ротора в синхронизм его частота вращения постоянна ($n_2=n_1$), вместо механической характеристики синхронного двигателя пользуются *угловой характеристикой* (рис. 42,*б*) — зависимостью синхронизирующего момента M_c от угла нагрузки β:

$$M_c=c_м\Phi_мI_1\sin\beta=c_{м1}\Phi_м\Phi_1\sin\beta, \qquad (56)$$

где $c_м$, $c_{м1}$ — постоянные коэффициенты, зависящие от обмоточных данных двигателя; $\Phi_м=B_мS_м$ — поток постоянных магнитов; $\Phi_1=B_1S_1$ — магнитный поток статора; β — угол между осями магнитных потоков $\Phi_м$ и Φ_1.

При отсутствии нагрузки на валу двигателя ($M_в=0$) оси магнитных потоков $\vec{\Phi}_м$ и $\vec{\Phi}_1$ совпадают в пространстве (рис. 43,*а*). В этом режиме, называемом *идеальным холостым ходом двигателя*, угол нагрузки $\beta=0$ и синхронизирующий момент $M_c=0$. При увеличении нагрузки поток $\vec{\Phi}_м$ отстает от потока $\vec{\Phi}_1$ на угол β, зависящий от внешнего момента сопротивления $M_в$ (рис. 43,*б*). При угле нагрузки $\beta=90°$ двигатель развивает максимальный синхронизирующий момент $M_{c\,max}$ (рис. 43,*в*). При дальнейшем возрастании нагрузки угол β увеличивается, а синхронизирующий момент уменьшается. Равенство внешнего и электромагнитного моментов нару-

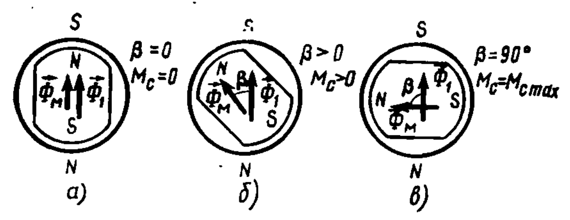


Рис. 43. Схема образования синхронизирующего момента СДПМ при различных углах нагрузки β (*а, б, в*)

шается ($M_в > M_с$) и двигатель выходит из синхронизма — переходит в асинхронный режим (см. рис. 42) или останавливается. Поэтому максимальный синхронизирующий момент называют еще и *моментом выхода из синхронизма* $M_{вых}$. Таким образом, СДПМ может работать статически устойчиво лишь на участке *ОА* угловой характеристики (см. рис. 42, *б*). Этому участку соответствует зона углов нагрузки $0 \leqslant \beta \leqslant 90°$.

Момент выхода из синхронизма характеризует перегрузочную способность двигателя — отношение максимального синхронизирующего к номинальному моменту $k_м = M_{вых}/M_{ном}$. В современных СДПМ малой мощности $k_м = 2 \div 3$. Синхронные двигатели с постоянными магнитами значительно меньше чувствительны к колебаниям напряжения питания, чем асинхронные двигатели и другие типы синхронных двигателей. Из уравнения (56) видно, что синхронизирующий момент пропорционален напряжению питания в первой степени $M_с \sim U_1$, так как лишь магнитный поток статора зависит от напряжения ($\Phi_1 \sim U_1$), а остальные величины от напряжения не зависят.

Поскольку магнитный поток возбуждения в СДПМ создается постоянными магнитами, а не токами, потребляемыми от дополнительного источника, эти двигатели обладают высоким кпд.

В рабочем (синхронном) режиме короткозамкнутая пусковая обмотка играет роль электромагнитного демпфера, уменьшая отклонения (качания) частоты вращения ротора от синхронной частоты, возникающие из-за колебаний напряжения питания или нагрузки. Поэтому СДПМ обладают высокой стабильностью частоты вращения.

Недостатки СДПМ, так же как и их достоинства, обусловлены наличием постоянных магнитов, которые ухудшают пусковые свойства двигателей, поскольку участвуют в создании тормозного момента, и повышают их стоимость в случае использования дорогого магнитно-твердого материала.

§ 17. Синхронные реактивные двигатели

Конструкция СРД. Отличительная особенность синхронных реактивных двигателей — явнополюсная конструкция ротора без какой-либо системы возбуждения. Статор СРД выполнен так же, как и в микродвигателях переменного тока. Наиболее распространенной конструкцией ротора СРД является конструкция простого явнополюсного ротора (рис. 44,*а*). Такой ротор отличается от короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя лишь наличием больших междуполюсных вырезов (пазов) *1*, с помощью которых образуются явновыраженные полюсы *2*. Линии, совпадающие с осями полюсов, называются *продольными осями d*, а линии, проходящие между полюсами,— *поперечными осями q*. Воздушный зазор между статором и ротором по продольной оси меньше, чем по поперечной, поэтому магнитное сопротивление $R_{мd}$ по продольной меньше магнитного сопротивления $R_{мq}$ по поперечной оси ($R_{мd} < R_{мq}$). Пусковую короткозамкнутую обмотку *3* ротора выполняют обычно в виде «беличьей клетки» заливкой всех пазов алюминием.

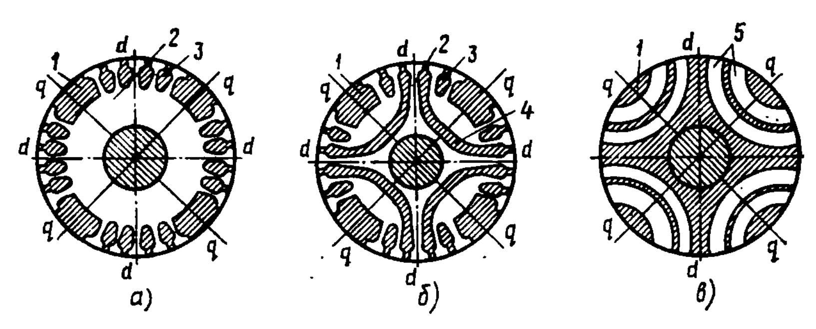


Рис. 44. Роторы СРД:

а — простой, *б* — усовершенствованный, *в* — секционированный; *1, 4* — междуполюсный и немагнитный пазы, *2* — явновыраженный полюс, *3* — короткозамкнутая обмотка ротора, *5* — секционированная полоса

Реактивные двигатели с ротором простой конструкции имеют малую перегрузочную способность, низкие энергетические и синхронизирующие показатели. Мощность, которую может развить СРД простой конструкции в габаритах асинхронного двигателя при равенстве суммарных потерь, не превышает 50% мощности асинхронного двигателя.

В последние годы все чаще применяют СРД с усовершенствованным ротором, имеющим дополнительные внутренние немагнитные пазы *4* (рис. 44,*б*). Внутренние пазы, так же заливаемые алюминием, позволяют значительно увеличить разницу магнитных сопротивлений по продольной и поперечным осям, не увеличивая глубину и ширину междуполюсных вырезов.

В системах автоматики иногда применяют однофазные СРД с секционированным ротором (рис. 44,*в*), выполняемым из алюминия, в который при отливке закладывают полосы *5* из электротехнической стали.

Принцип действия СРД. Пуск синхронных реактивных двигателей осуществляется так же, как пуск СДПМ. При подключении СРД к сети он разгоняется до подсинхронной частоты вращения под действием асинхронного момента $M_{ас}$, возникающего в резуль-

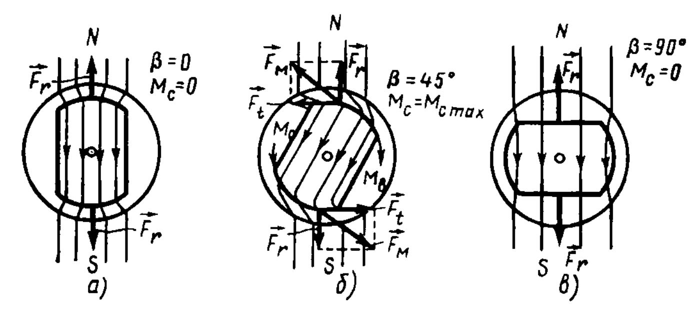


Рис. 45. Схема образования синхронизирующего момента СРД при различных углах нагрузки β (*а*, *б*, *в*)

тате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора B_1 с наведенными им токами I_2 в короткозамкнутой обмотке ротора.

Синхронизирующий момент M_c реактивного двигателя создается в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с явнополюсным невозбужденным ротором. Для выяснения принципа образования синхронизирующего момента поместим ротор с явновыраженными полюсами между неподвижными полюсами внешнего магнитного поля *N*, *S* (рис. 45). Тогда явнополюсный ротор займет по отношению к внешнему полю положение, соответствующее минимальному магнитному сопротивлению (рис. 45,*а*). При этом угол β (между продольной осью ротора и осью внешнего магнитного поля) равен нулю. На ротор будут действовать лишь радиальные магнитные силы тяжения F_r, не создающие вращающего момента ($M_c=0$), при этом ротор находится в устойчивом равновесии.

При отклонении ротора под действием внешнего момента $M_в$ от устойчивого положения кроме радиальных сил тяжения возникают тангенциальные силы тяжения F_t, создающие синхронизирующий момент $M_c=M_в$ (рис. 45,*б*). Максимальное значение этого момента обычно при угле $\beta=45°$. В положении ротора, показанном на рис. 45,*в*, угол $\beta=90°$, синхронизирующий момент так же равен нулю, как и на рис. 45,*а*. Такое положение ротора является неустойчивым, поскольку при малейшем возмущении он стремится повернуться на 90°.

Рассмотренная картина электромагнитных явлений будет такой же, если внешнее поле и ротор вращаются синхронно, т. е. если поле статора и ротор взаимно неподвижны. Отсюда следует важный вывод, что постоянный синхронизирующий момент в СРД возникает только при синхронной частоте вращения и наличии разности магнитных сопротивлений по осям *d* и *q*:

$$M_c=c_м\Phi_1^2\,(R_{мq}-R_{мd})\sin2\beta. \qquad (57)$$

Из выражения (57) видно, что синхронизирующий момент СРД

пропорционален квадрату напряжения питания ($M_c\sim U_1^2$, так как $\Phi_1\sim U_1$) и изменяется в функции удвоенного значения угла нагрузки β. На рис. 46 показаны пусковая механическая и угловая характеристики СРД. Устойчивой работе двигателя в синхронном режиме соответствует участок *ОА* угловой характеристики, находящийся в диапазоне изменения углов нагрузки $0\leqslant\beta\leqslant45°$. Углу нагрузки $\beta=45°$ соответствует максимальный синхронизирующий момент — момент выхода из синхронизма $M_{вых}$. При $M_в>M_{вых}$ двигатель либо останавливается, либо продолжает вращаться асинхронно.

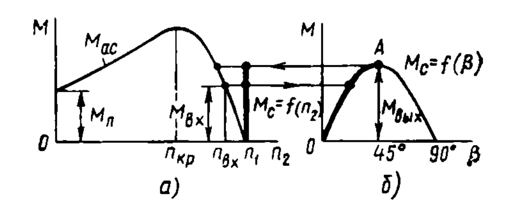


Рис. 46. Механическая (*а*) и угловая (*б*) характеристики СРД

Синхронные реактивные двигатели обладают меньшей перегрузочной способностью, чем СДПМ. В современных СРД $k_м=M_{вых}/M_{ном}=1{,}2\div1{,}5$. Объясняется это тем, что для увеличения синхронизирующего момента необходимо повысить магнитное сопротивление $R_{мq}$, т. е. углублять впадины на роторе по поперечной оси. Однако с углублением междуполюсных пазов возрастает среднее значение воздушного зазора, что ведет к увеличению потребляемого реактивного тока для создания магнитного поля, снижению энергетических показателей (кпд и cosφ), уменьшению пускового момента и момента входа в синхронизм.

§ 18. Синхронные гистерезисные двигатели

Конструкция СГД. Синхронные двигатели, у которых вращающий момент создается в результате явления гистерезиса при перемагничивании ферромагнитного материала ротора, называют *гистерезисными.*

Статор в СГД выполняют так же, как и в обычных микродвигателях переменного тока (рис. 47). Обмотка статора может быть трех- или двухфазной (с конденсатором в одной из фаз). Ротор гистерезисного двигателя изготовляют сборным: на вал *6* напрессовывают алюминиевую или стальную втулку *5*, на которой размещают гистерезисный слой (кольца) *4* из магнитно-твердого материала. Применение обычной стали для выполнения колец не обеспечивает получения достаточно большого электромагнитного момента, поэтому гистерезисный слой изготовляют из специальных магнитно-твердых сплавов, имеющих широкую петлю гистерезиса (викаллой, альнико).

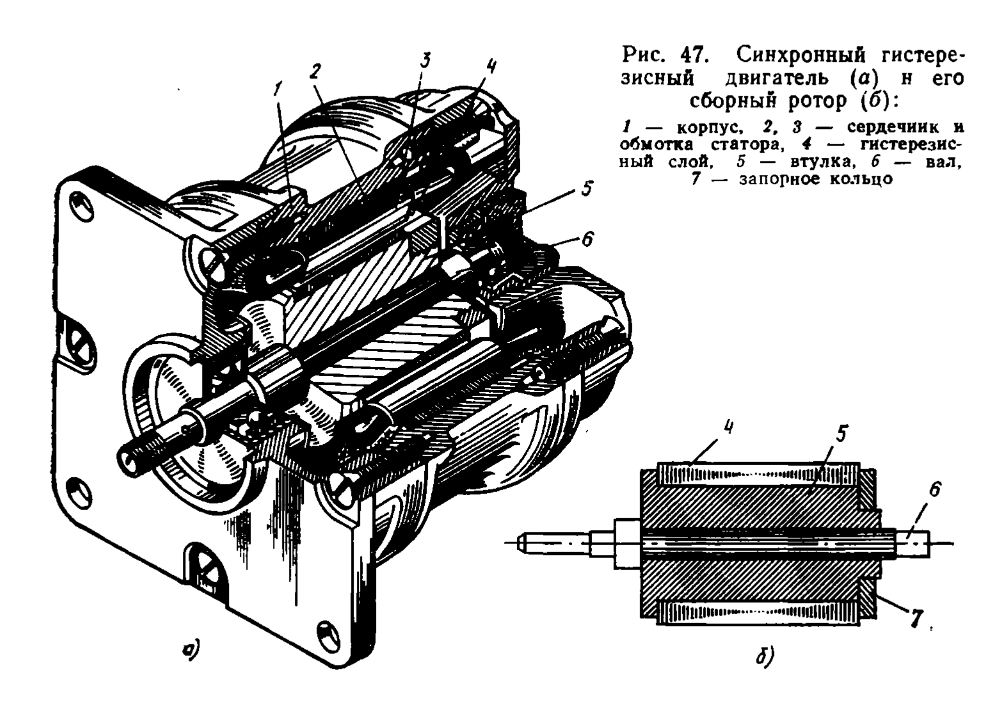


Рис. 47. Синхронный гистерезисный двигатель (*а*) и его сборный ротор (*б*):

1 — корпус, 2, 3 — сердечник и обмотка статора, 4 — гистерезисный слой, 5 — втулка, 6 — вал, 7 — запорное кольцо

В СССР синхронные гистерезисные двигатели выпускают серийно на промышленную (50 Гц) и повышенные (400, 500 Гц) частоты в трехфазном и однофазном исполнениях.

Принцип действия СГД. Вращающий момент $M_г$ в гистерезисном двигателе создается за счет взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с магнитным полем ротора, возникающим в результате намагничивания гистерезисного слоя полем статора. Для выяснения физической сущности образования гистерезисного момента рассмотрим рис. 48, на котором ротор из магнитно-твердого материала расположен между полюсами внешнего магнитного поля.

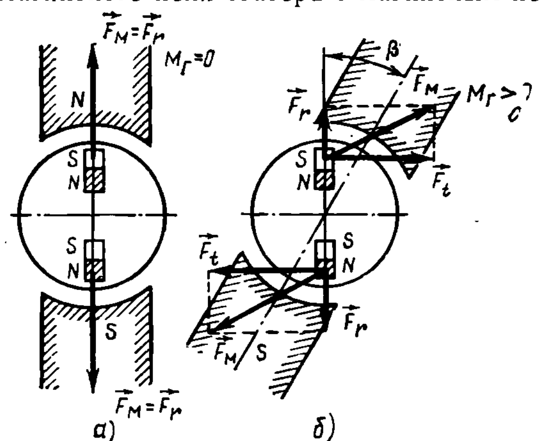


Рис. 48. Схемы образования вращающего момента СГД

Под действием внешнего магнитного поля ротор намагничивается: на стороне, обращенной к северному полюсу, возбуждается южный полюс, а на стороне, обращенной к южному полюсу, — северный (рис. 48, *а*). При этом на ротор действуют магнитные силы тяжения $\vec{F}_м$, направленные радиально ($\vec{F}_м=\vec{F}_r$). Как видно из рисунка, они никакого вращающего момента не создают ($M_г=0$).

Если полюсы внешнего поля вращаются вокруг ротора, то возбужденные элементарные магнитики, образующие поле ротора, поворачиваются вслед за внешним полем. Однако из-за молекулярного трения, которое у материалов с широкой петлей гистерезиса очень велико, элементарные магнитики несколько отстают от внешнего поля (рис. 48,*б*). При этом магнитные силы тяжения $\vec{F}_м$ кроме радиальных составляющих $\vec{F}_r$ имеют тангенциальные составляющие $\vec{F}_t$, которые создают вращающий момент $M_г$.

При питании двигателя часть подводимой мощности расходуется на потери в роторе. Поскольку магнитно-твердые материалы обладают очень большим удельным электрическим сопротивлением, электрические потери в гистерезисном слое пренебрежимо малы и потери в роторе по существу представляют собой потери на перемагничивание ротора (гистерезисные потери). Эти потери зависят от частоты перемагничивания ротора $f_2=f_1 s$ и, следовательно, от скольжения:

$$P_г=sP_{г.п}, \qquad (58)$$

где $P_{г.п}$ — гистерезисные потери при неподвижном роторе ($s=1$; $f_2=f_1$).

Согласно уравнению (46), электромагнитная мощность, передаваемая ротору, равна потерям в роторе, деленным на скольжение: $P_{эм}=P_г/s=P_{г.п}$. Отсюда следует, что вращающий момент гистерезисного двигателя не зависит от частоты вращения ротора (скольжения):

$$M_г=P_{эм}/\Omega_1=P_{г.п}/\Omega_1. \qquad (59)$$

Механическая характеристика гистерезисного двигателя (рис. 49) представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс. Способность СГД сохранять вращающий момент от пуска $n_2=0$ до синхронной частоты вращения $n_2=n_1$ обусловила их широкое применение при работе на нагрузку с большим моментом инерции.

Основной недостаток СГД — низкий коэффициент мощности $\cos\varphi$, что объясняется большим магнитным сопротивлением магнитно-твердых материалов. Поэтому для создания магнитного поля из сети потребляется значительный реактивный ток.

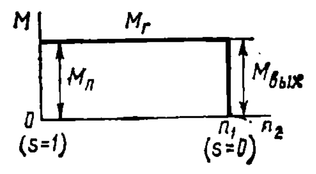


Рис. 49. Механическая характеристика СГД

Гистерезисный вращающий момент возникает не только в СГД, но и в обычных машинах переменного тока. Однако

из-за узкой петли гистерезиса электротехнической стали он незначителен и им пренебрегают.

Контрольные вопросы

1. Какие электрические машины называют синхронными?
2. Какие типы синхронных двигателей вы знаете?
3. Каковы достоинства и недостатки каждого типа двигателя?
4. Как осуществляют пуск синхронных двигателей?
5. Объясните процесс образования синхронизирующих моментов в синхронных двигателях.
6. Сравните пусковые и рабочие свойства синхронных двигателей.

ГЛАВА IV. КОЛЛЕКТОРНЫЕ МИКРОДВИГАТЕЛИ

§ 19. Общие сведения

Максимальная частота вращения ротора рассмотренных выше асинхронных и синхронных микродвигателей не превышает при промышленной частоте напряжения ($f_1=50$ Гц) 3000 об/мин. В то же время для привода различных механизмов судов, летательных аппаратов, бытовых приборов требуются электродвигатели с большей частотой вращения ротора. Для решения этой задачи на практике применяют либо специальные источники повышенной частоты напряжения, либо коллекторные двигатели.

В зависимости от рода питающего напряжения различают коллекторные микродвигатели постоянного и переменного тока. Коллекторные микродвигатели постоянного тока используют в основном в автономных системах спецтехники, а переменного тока — в бытовой технике (пылесосах, швейных машинах, кофемолках, миксерах, электродрелях), медицинской технике, технике связи и др.

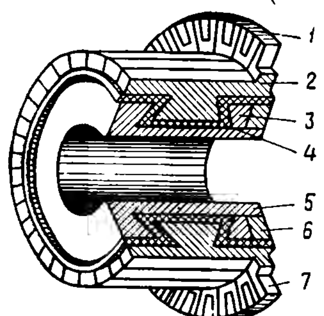


Рис. 50. Устройство коллектора:

1 — изоляционные прокладки, *2* — коллекторные пластины, *3* — нажимная шайба, *4* — изоляционная манжета, *5* — втулка, *6* — гайка, *7* — «петушки»

Отличительной конструктивной особенностью всех коллекторных двигателей является наличие щеточно-коллекторного узла — механического преобразователя частоты, с помощью которого осуществляется скользящий электрический контакт между внешней цепью и обмоткой ротора.

Устройство щеточно-коллекторного узла. Обычно коллектор выполняют в виде цилиндра (рис. 50), собранного из клинообразных пластин *2* твердотянутой меди. Между пластинами располагают изоляционные миканитовые прокладки *1* из склеенной щепаной

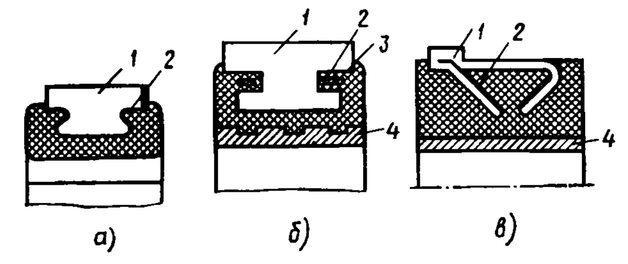


Рис. 51. Схемы коллекторов на пластмассе с непосредственной посадкой на вал (*а*) и с помощью втулки (*б*, *в*):

1 — коллекторные пластины, *2* — пластмассовый корпус, *3* — армирующее кольцо, *4* — втулка

слюды. Для удобства монтажа и обеспечения прочности крепления нижнюю часть пластин и прокладок выполняют в форме «ласточкина хвоста». Пластины и прокладки размещают на втулке *5* коллектора, изолированной миканитовой манжетой *4*, и закрепляют нажимной шайбой *3* и гайкой *6*. Чтобы миканитовые прокладки при срабатывании коллектора не выступали над пластинами и не нарушали контакт со щетками, их фрезеруют на глубину до 1,5 мм. Для соединения обмотки ротора с проводниками коллекторные пластины выполняют с выступами — «петушками» *7*, которые имеют прорези для укладки и запайки в них концов катушек.

В двигателях малой мощности медные пластины и миканитовые прокладки часто запрессовывают в пластмассу (рис. 51, *а*, *б*, *в*). Для придания коллектору механической прочности иногда в зоне «ласточкина хвоста» располагают армирующие кольца *3*. Коллекторы на пластмассе проще и дешевле в изготовлении. Собранный коллектор закрепляют жестко на валу ротора.

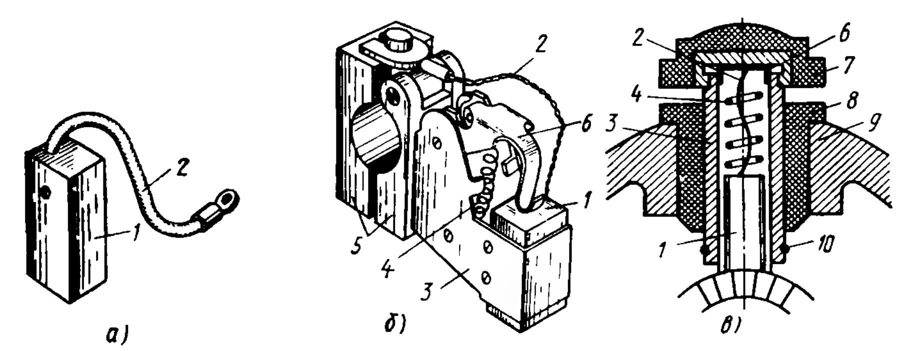


Рис. 52. Конструкция щеток (*а*) и щеткодержателей (*б*, *в*):

1 — щетка, *2* — медный канатик, *3* — обойма, *4* — пружина, *5* — зажимы для крепления к пальцу, *6* — нажимная пластина, *7* — колпак, *8* — изоляционная втулка, *9* — подшипниковый щит, *10* — зажим для выводного провода

Коллекторные пластины, а следовательно, и обмотку ротора соединяют с источником электрической энергии с помощью неподвижных щеток, которые могут быть: угольно-графитные, графитные, электрографитированные, медно-графитные, бронзографитные и серебряно-графитные. Щетки *1* (рис. 52) устанавливают в металлических обоймах *3* щеткодержателей и с помощью пружин *4* и нажимных пластин *6* прижимают к цилиндрической поверхности коллектора. Щеткодержатели укрепляют на подшипниковом щите *9* либо с помощью изолирующих пальцев и траверсы, либо пластмассовой изоляционной втулкой *8*.

Наличие скользящего электрического контакта значительно ограничивает применение коллекторных двигателей, особенно в тяжелых условиях эксплуатации (агрессивные и взрывоопасные среды, пониженное давление воздуха, тряска, вибрация и т. п.).

§ 20. Устройство микродвигателей постоянного тока

Конструкция двигателей постоянного тока. В зависимости от способа возбуждения различают двигатели постоянного тока (ДПТ) с электромагнитным возбуждением и с возбуждением от постоянных магнитов. Двигатели мощностью несколько десятков ватт и выше имеют обычно электромагнитное возбуждение (рис. 53).

Двигатель имеет защищенное исполнение. Его статор состоит из станины *1*, на внутренней поверхности которой расположены явновыраженные полюсы *2*. Стальная станина является одновременно корпусом двигателя и элементом магнитной цепи. Сердечник полюса может быть отлит из стали, но чаще его набирают из штампованных листов электротехнической стали. На полюсах размещают катушки, образующие обмотку возбуждения *5*. Катушки полюсов изготовляют из медного изолированного провода, наматываемого на каркас, и соединяют между собой так, чтобы при прохождении по ним постоянного тока полярности полюсов чередовались. Полюсы крепят к станине болтами.

Ротор в машинах постоянного тока является якорем и состоит из сердечника, обмотки, коллектора и вала. Сердечник *3* ротора представляет собой цилиндр, набранный из штампованных изолированных листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. В полузакрытые пазы сердечника ротора укладывают активные стороны секций (катушек) обмотки *4* якоря. Секции выполняют из медного изолированного провода, а их концы припаивают к пластинам коллектора *7*. Обмотку якоря укрепляют в пазах гетинаксовыми клиньями, а на лобовые части накладывают бандажи *14* из стеклоленты или шнура.

В зависимости от схемы включения обмотки возбуждения двигатели постоянного тока подразделяют: на *двигатели независи-*

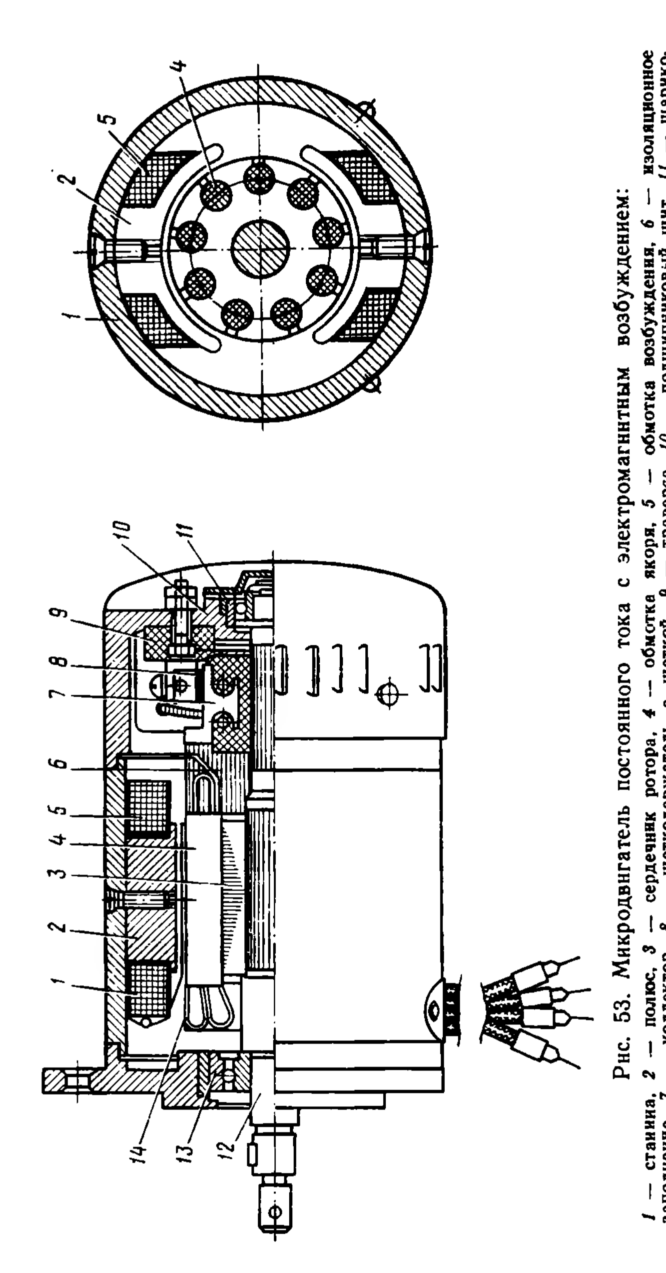


Рис. 53. Микродвигатель постоянного тока с электромагнитным возбуждением:

1 — станина, *2* — полюс, *3* — сердечник ротора, *4* — обмотка якоря, *5* — обмотка возбуждения, *6* — изоляционное заполнение, *7* — коллектор, *8* — щеткодержатель с щеткой, *9* — траверса, *10* — подшипниковый щит, *11* — шарикоподшипник, *12* — вал, *13* — армирующая втулка, *14* — бандаж

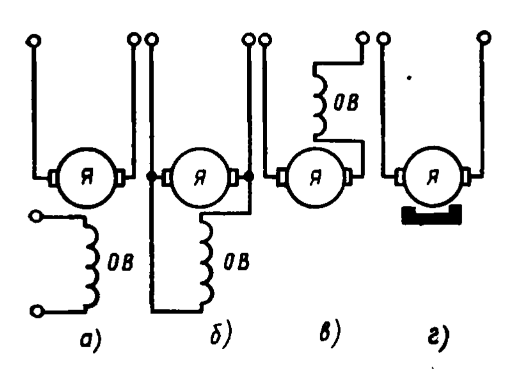


Рис. 54. Способы возбуждения микродвигателей постоянного тока:
а — независимого, *б* — параллельного, *в* — последовательного, *г* — от постоянных магнитов

мого возбуждения, в которых обмотка возбуждения *ОВ* питается постоянным током от источника, электрически не связанного с обмоткой якоря (рис. 54,*а*); *двигатели параллельного (шунтового) возбуждения,* в которых обмотки возбуждения и якоря соединены параллельно (рис. 54,*б*); *двигатели последовательного (сериесного) возбуждения,* в которых обмотка возбуждения соединена последовательно с обмоткой якоря (рис. 54, *в*).

Начала и концы обмоток ДПТ обозначают так: якоря — Я1, Я2; независимого возбуждения—Н1, Н2; параллельного (шунтового) возбуждения — Ш1, Ш2; последовательного (сериесного) возбуждения — С1, С2. В двигателях мощностью от долей ватта до нескольких десятков ватт в основном применяют магнитоэлектрическое возбуждение, т. е. возбуждение от постоянных магнитов (рис. 54, *г*). Конструкция микродвигателя постоянного тока с постоянными магнитами серии ДПМ показана на рис. 55.

Корпус двигателя состоит из литого двухполюсного постоянного магнита *2* цилиндрической формы, к торцевым частям которого прилиты выполненные из цинкового сплава концевые части

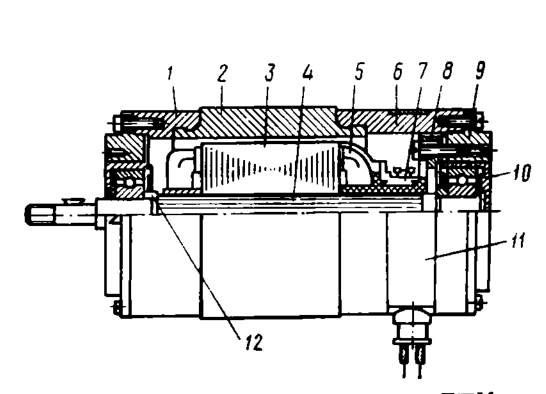


Рис. 55. Микродвигатель серии ДПМ:
1, 6 — приливы, *2* — постоянный магнит, *3* — сердечник ротора, *4* — вал, *5* — обмотка якоря, *7* — коллектор, *8* — траверса, *9* — подшипниковый щит, *10* — втулка, *11* — защитная лента, *12* — маслоотражательная шайба

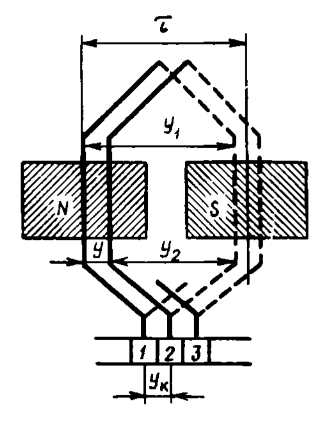


Рис. 56. Шаги простой петлевой обмотки

(приливы) *1* и *6*. В концевом приливе *6* имеются окна для доступа к щеткодержателям, закрытые защитной лентой *11*. К корпусу винтами прикреплены выполненные из цинкового сплава подшипниковые щиты *9*. Эти щиты заливают на стальные втулки *10*, в которых размещают шарикоподшипники. Пластмассовая траверса *8* с щеткодержателями закреплена на подшипниковом щите *9*.

Якорь двигателя состоит из вала *4*, на который напрессованы сердечник *3* ротора из электротехнической стали и коллектор *7* на пластмассе. В сердечнике ротора выполнены круглые полузакрытые пазы, в которые уложена обмотка *5* якоря.

Устройство обмоток якоря. Обмотки якоря состоят из ряда последовательно соединенных многовитковых секций, каждая из которых имеет две активные стороны и лобовые части с торцов пакета. Во избежание пересечений лобовых соединений обмотки выполняют двухслойными: одна активная сторона каждой секции лежит в верхнем слое паза, другая — в нижнем. Расстояние между активными сторонами секции выбирают так же, как и в машинах переменного тока (примерно равным полюсному делению $\tau=\pi D/(2p)$, где D — диаметр ротора). Форма секций и порядок присоединения их к коллекторным пластинам зависят от типа обмотки. В микродвигателях постоянного тока чаще всего используют *простые петлевые обмотки.*

В петлевых обмотках различают следующие шаги (рис. 56): первый частичный y_1 — расстояние между активными сторонами секции ($y_1\approx\tau$); второй частичный y_2 — расстояние между конечной стороной предыдущей и начальной стороной последующей секции; результирующий y — расстояние между начальными сторонами предыдущей и последующей секций. На практике шаги обмотки измеряют числом элементарных пазов. Элементарный паз содержит две активные стороны секций, лежащие друг над другом. В общем случае один реальный паз якоря может содержать один (рис. 57, *а*), два (рис. 57, *б*) и более элементарных пазов. Очевидно, общее число элементарных пазов ротора $Z_э=u_пZ$ ($u_п$ — число элементарных пазов в одном реальном; Z — число реальных пазов).

В одном полюсном делении τ_Z содержится $Z_э/(2p)$ элементарных пазов. Но часто $Z_э$ не делится без остатка на $2p$. Тогда, чтобы сторона секции попала в паз, а не на зубец, вводят дробную величину ε, с помощью которой округляют значение первого частичного шага до целого числа:

$$y_{1z}=Z_э/(2p)-\varepsilon=\text{целое число}. \quad (60)$$

Простая петлевая обмотка характеризуется тем, что результирующий шаг $y_Z=1$.

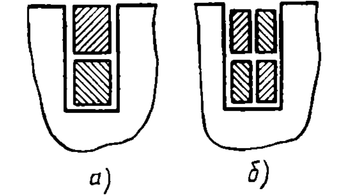


Рис. 57. Подразделение реального паза на элементарные:
а — $U_п=1$, *б* — $U_п=2$

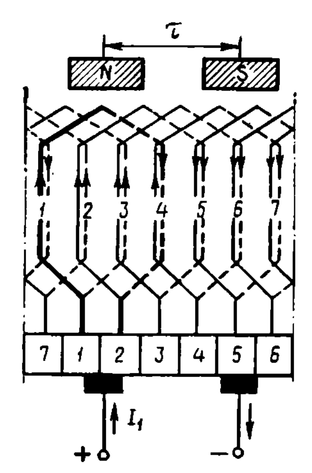


Рис. 58. Развернутая схема простой петлевой обмотки двигателя серии ДПМ

Секции обмотки соединяют друг с другом в последовательную цепь, чтобы начало последующей секции и конец предыдущей были присоединены к одной коллекторной пластине. Поскольку каждая секция имеет два вывода и к каждой коллекторной пластине присоединены также выводы двух секций, общее число коллекторных пластин K равно числу секций обмотки S и числу элементарных пазов $Z_э$, т. е. $K=S=Z_э$.

В простой петлевой обмотке концы каждой секции присоединены к двум рядом лежащим коллекторным пластинам. При этом шаг по коллектору $y_к$ (расстояние в коллекторных делениях между серединами коллекторных пластин, к которым присоединены концы одной секции) равен результирующему шагу обмотки: $y_к=y_Z=1$.

На рис. 58 приведена развернутая схема простой петлевой обмотки ДПМ при $Z_э=S=K=7$, $2p=2$, $y_{1Z}=3$. Стороны секций, лежащие в верхнем слое, изображены сплошными линиями, а стороны, лежащие в нижнем слое, — штриховыми. Из схемы видно, что конец последней (седьмой) секции соединен с началом первой секции. Таким образом, обмотка якоря в ДПМ является замкнутой.

Число щеток на коллекторе простой петлевой обмотки всегда равно числу полюсов. При $2p>2$ щетки одинаковой полярности соединяют параллельно. Щетки устанавливают так, чтобы они замыкали секции, активные стороны которых находятся между полюсами (на геометрической нейтрали).

Поскольку обмотка якоря замкнута «сама на себя», ее секции образуют по отношению к щеткам параллельные ветви, каждая из которых представляет собой группу последовательно соединенных секций с одинаковым направлением тока в них. Число параллельных ветвей $2a$ в простой петлевой обмотке всегда равно числу полюсов: $2a=2p$.

При вращении ротора секции обмотки якоря поочередно переходят из одной параллельной ветви в другую, при этом направление тока в секции (см. рис. 58) меняется на обратное. Таким образом, при питании двигателя от источника постоянного напряжения в обмотке якоря проходит переменный ток. Преобразование постоянного тока источника в такой необычный переменный ток обмотки якоря и осуществляется щеточно-коллекторным узлом.

Секции, в которых в данный момент времени происходит изменение тока на обратный, называют ***коммутируемыми***, а совокупность явлений, возникающих при переходе этих секций из одной параллельной ветви в другую, — ***коммутацией***. Коммутация обычно сопровождается искрением между щетками и коллектором, что приводит к подгоранию коллектора и щеток, снижает срок службы и надежность двигателей постоянного тока, является источником радиопомех.

§ 21. Принцип действия двигателей постоянного тока

Принцип действия двигателей постоянного тока рассмотрим на примере ДПТ параллельного возбуждения. Принципиальная схема включения такого двигателя показана на рис. 59. Поскольку в двигателях малой мощности обмотки якоря обладают большим собственным активным сопротивлением $R_я$, пусковые реостаты для ограничения пусковых токов в таких двигателях не применяют.

При подключении двигателя к источнику электрической энергии в проводниках обмотки якоря проходит ток $I_я=I_1/(2a)$, а в обмотке возбуждения — ток $I_в=U_1/(R_в+R_{рег})$. Согласно закону полного тока (5), постоянный ток возбуждения $I_в$ создает постоянное магнитное поле $B_в$, которое не перемагничивает сталь статора и не вызывает магнитных потерь, поэтому станину в ДПТ выполняют массивной.

Согласно закону электромагнитных сил (16), в результате взаимодействия поля возбуждения с токами якоря на каждый проводник ротора действует электромагнитная сила $F_{эм}=B_вL_яI_я$ (рис. 60). Совокупность всех сил, действующих на проводники обмотки якоря, создает вращающий электромагнитный момент (Н·м)

$$M=NF_{эм}D/2=[pN/(2\pi a)]\Phi_вI_1=c_м\Phi_вI_1, \quad (61)$$

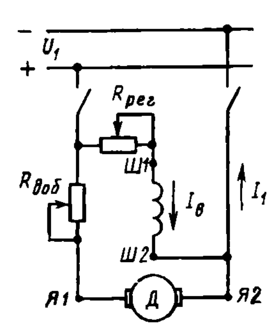


Рис. 59. Схема включения ДПТ параллельного возбуждения

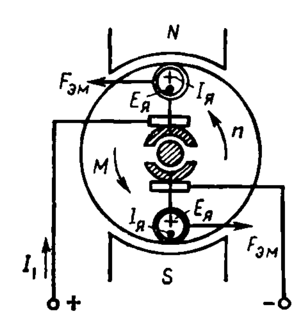


Рис. 60. К принципу действия двигателя постоянного тока

где N — число проводников обмотки якоря; $D=2p\tau/\pi$ — диаметр ротора, м; $\Phi_в=B_вL_я\tau$ — магнитный поток возбуждения, Вб; I_1 — ток, потребляемый обмоткой якоря, А; $L_я$ — активная длина проводника, равная длине сердечника ротора, м.

Под действием электромагнитного момента ротор двигателя начинает вращаться, при этом в проводниках обмотки якоря, согласно закону электромагнитной индукции (8), наводится эдс $E_{пр}=B_вL_яv_{пр}$. Электродвижущая сила обмотки якоря между щетками разной полярности равна сумме эдс проводников, составляющих одну параллельную ветвь:

$$E_я=E_{пр}N/(2a)=[pN/(60a)]\Phi_вn=c_e\Phi_вn. \quad (62)$$

В двигателях постоянного тока эдс якоря, как в этом нетрудно убедиться, рассматривая рис. 60 и применяя правило правой руки, всегда направлена встречно току, поэтому ее называют противоэдс.

Угловая скорость вращения ротора ДПТ возрастает до тех пор, пока вращающий момент M не уравновесит внешний момент сопротивления $M_в$. При равенстве моментов $M=M_в$ двигатель работает в установившемся режиме с постоянной частотой вращения ротора и потребляет ток

$$I_1=(U_1-E_я)/(R_я+R_{доб}). \quad (63)$$

Используя уравнения (61) и (62), можно определить из формулы (63) механическую характеристику двигателя параллельного возбуждения:

$$n=U_1/(c_e\Phi_в)-M(R_я+R_{доб})/(c_ec_м\Phi^2_в)=n_0-\Delta n, \quad (64)$$

где n_0 — частота вращения идеального холостого хода ($M=0$); Δn — изменение частоты вращения под действием нагрузки.

Из выражения (64) видно, что механическая характеристика ДПТ параллельного возбуждения (зависимость частоты вращения ротора n от момента M при неизменных напряжении питания и сопротивлении цепи возбуждения) линейна и, следовательно, статически устойчива во всем диапазоне частот вращения двигательного режима $0\leqslant n\leqslant n_0$. Из этого выражения также следует,

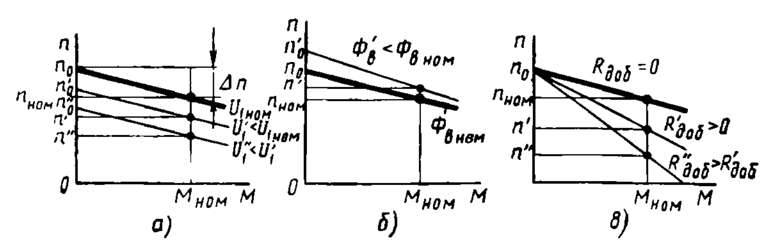


Рис. 61. Механические характеристики ДПТ параллельного возбуждения:
а — при изменении напряжения, *б* — при изменении тока возбуждения, *в* — при введении добавочного сопротивления в цепь якоря

что регулировать (изменять) частоту вращения ДПТ при неизменной нагрузке на валу ($M_в$=const) можно тремя способами: изменением подводимого к двигателю напряжения U_1; введением в цепь обмотки якоря добавочного сопротивления $R_{доб}$; изменением магнитного потока $\Phi_в$ (введением регулировочного сопротивления в цепь обмотки возбуждения $R_{рег}$).

На рис. 61, *а, б, в* приведены механические характеристики ДПТ параллельного возбуждения при различных способах регулирования. Возможность плавного и широкодиапазонного регулирования частоты вращения ротора является основным достоинством ДПТ, обусловившим их применение в различных областях техники.

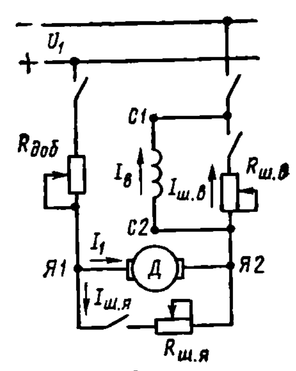


Рис. 62. Схема включения ДПТ последовательного возбуждения

Особенности ДПТ последовательного возбуждения. Принципиальная схема включения двигателя последовательного возбуждения показана на рис. 62. Отличительной особенностью такого двигателя является равенство тока возбуждения току якоря ($I_в=I_1$). Отсюда следует, что магнитный поток возбуждения пропорционален потребляемому току: $\Phi_в=c_\Phi I_1$ (c_Φ — коэффициент пропорциональности). Благодаря этому двигатели последовательного возбуждения способны развивать большие пусковые вращающие моменты при сравнительно небольших токах:

$$M=c_м\Phi_вI_1=c_мc_\Phi I_1^2. \quad (65)$$

Механическую характеристику двигателя легко определить из формулы (64), если учесть, что $\Phi_в=c_\Phi I_1=c_\Phi\sqrt{M/(c_мc_\Phi)}$:

$$n=\frac{U_1}{c_ec_\Phi\sqrt{M/(c_мc_\Phi)}}-\frac{R_я+R_{доб}}{c_ec_\Phi}. \quad (66)$$

Из этого уравнения следует, что механическая характеристика ДПТ последовательного возбуждения (рис. 63) имеет гиперболический характер. При малых нагрузках ($M\to0$) частота вращения ротора резко возрастает и может превысить максимально допустимое значение (двигатель идет в «разнос»), поэтому такие двигатели нельзя включать в сеть без нагрузки. Обычно минимально допустимая нагрузка составляет 20—25% номинальной ($M_{в\,min}=0{,}2\div0{,}25\ M_{ном}$).

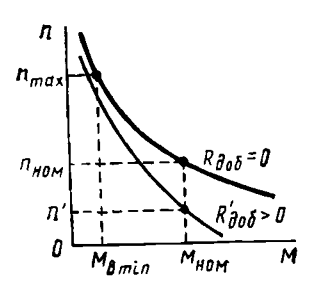


Рис. 63. Механические характеристики ДПТ последовательного возбуждения

Регулирование частоты вращения ротора в двигателе последовательного возбуждения осуществляется теми же способами, что и в двигателе параллельного возбуждения. Однако регулирование частоты вращения изменением магнитного потока осуществляется шунтированием либо обмотки возбуждения, либо обмотки якоря (см. рис. 62). В первом случае снижение сопротивления $R_{ш.в}$ вызывает уменьшение тока возбуждения $I_в = I_1 - I_{ш.в}$ и, следовательно, увеличение частоты вращения. Во втором случае уменьшение сопротивления $R_{ш.я}$ приводит к увеличению тока возбуждения $I_в = I_1 + I_{ш.я}$ и снижению частоты вращения.

§ 22. Коллекторные микродвигатели переменного тока

Коллекторные двигатели переменного тока по конструкции аналогичны двигателям постоянного тока последовательного возбуждения, за исключением магнитопровода статора (содержащего станину и полюсы), который выполняют шихтованным из листов электротехнической стали (рис. 64). Это позволяет уменьшить магнитные потери от вихревых токов, наводимых переменным магнитным потоком возбуждения.

Схема включения коллекторных двигателей переменного тока аналогична схеме, показанной на рис. 62. Однако при питании двигателя в обмотках статора и ротора проходит переменный ток, изменяющийся с частотой сети $f_1: I_1 = I_{1\,max}\sin\omega t$. Проходя по обмотке возбуждения, этот ток создает переменный (пульсирующий) магнитный поток $\Phi_в = \Phi_{в\,max}\sin\omega t$.

Вращающий момент в коллекторном двигателе переменного тока образуется так же, как в двигателе постоянного тока, в результате взаимодействия магнитного потока возбуждения с токами якоря: $M = c_м\Phi_в I_1 = c_м\Phi_{в\,max}I_{1\,max}\sin^2\omega t$. Учитывая, что $\sin^2\omega t = (1-\cos 2\omega t)/2$, получим

$$M = 0{,}5\ [(c_м\Phi_{в\,max}I_{1\,max}) - (c_м\Phi_{в\,max}I_{1\,max}\cos 2\omega t)]. \quad (67)$$

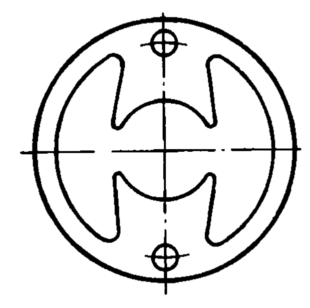


Рис. 64. Лист сердечника статора коллекторного двигателя переменного тока

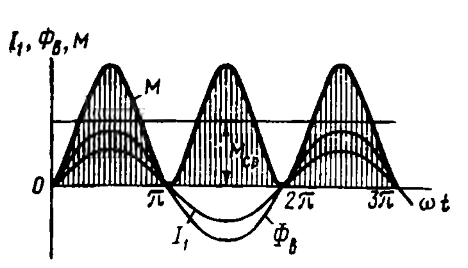


Рис. 65. Графики изменения тока, магнитного потока и вращающего момента коллекторного двигателя переменного тока

Из этого выражения следует, что вращающий момент коллекторного двигателя переменного тока состоит из постоянной (средней) составляющей $M_{ср} = 0{,}5\ c_м\Phi_{в\,max}I_{1\,max}$ и переменной составляющей $M_{пер} = 0{,}5\,c_м\Phi_{в\,max}I_{1\,max}\cos 2\omega t$, изменяющейся с удвоенной частотой сети. Графики изменения тока I_1 магнитного потока $\Phi_в$ и вращающего момента M показаны на рис. 65.

Хотя вращающий момент является переменным, ротор вращается практически с постоянной частотой, поскольку обладает сравнительно большим моментом инерции.

По своим рабочим свойствам коллекторные двигатели переменного тока несколько уступают двигателям постоянного тока последовательного возбуждения. Основной недостаток коллекторных двигателей переменного тока — значительное искрение под щетками.

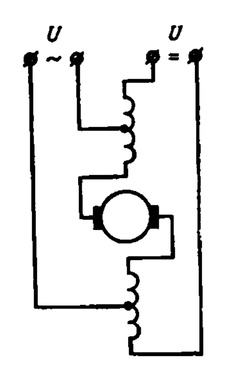


Рис. 66. Схема включения универсального коллекторного двигателя

Универсальные коллекторные двигатели — двигатели малой мощности, предназначенные для работы от источников как постоянного, так и переменного тока. Конструктивно они не отличаются от коллекторных двигателей переменного тока.

В универсальных коллекторных двигателях стремятся получить примерно одинаковые номинальные частоты вращения как на постоянном, так и на переменном токе. Достигается это тем, что обмотку возбуждения выполняют с отпайками: при работе двигателя от сети постоянного тока включают все витки обмотки возбуждения, а при работе на переменном токе — только часть их (рис. 66).

Универсальные коллекторные микродвигатели применяют в основном в бытовых электроприборах.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение щеточно-коллекторного узла в машине постоянного тока?
2. Какие схемы возбуждения двигателей постоянного тока применяют на практике?
3. Назовите способы регулирования частоты вращения двигателей.
4. Каковы достоинства и недостатки двигателей постоянного тока с различными способами возбуждения?
5. Какой коллекторный двигатель называют универсальным?

ГЛАВА V. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

§ 23. Общие сведения

Электрические машины, преобразующие электрический сигнал управления в механическое перемещение вала, называют *исполнительными двигателями*. Такие двигатели широко применяют в

схемах автоматики, счетно-решающих устройствах, следящих системах, робототехнике.

Исполнительные двигатели (ИД) работают, как правило, в переходных режимах, для которых характерны частые пуски, остановки, изменения направления вращения. В таких режимах работы использование для охлаждения ИД вентилятора малоэффективно, поэтому он не применяется.

В зависимости от назначения и применения к ИД предъявляют общие и специальные требования.

К общим требованиям относят: работоспособность при заданных климатических условиях и механических нагрузках; большой пусковой момент; хорошие энергетические показатели; малые габариты и массу; высокую надежность. Основными специальными требованиями являются: устойчивость работы во всем диапазоне частот вращения двигательного режима; линейность механических и регулировочных характеристик; широкий диапазон регулирования частоты вращения; малая мощность управления; высокое быстродействие (малая электромеханическая постоянная времени); отсутствие самохода (самоторможение двигателя при снятии сигнала управления).

Перечисленные требования большей частью противоречивы, поэтому в каждом случае важно выделить главные из них и руководствоваться ими при выборе того или иного типа ИД. В настоящее время в качестве ИД используют двухфазные асинхронные двигатели переменного тока с повышенным активным сопротивлением ротора, двигатели постоянного тока с независимым возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов, шаговые двигатели.

§ 24. Асинхронные исполнительные двигвтели

Устройство. Асинхронные ИД в отличие от двигателей общего назначения выполняют с повышенным активным сопротивлением обмотки ротора R_2. Увеличение этого сопротивления (см. § 9) приводит к возрастанию критического скольжения $s_{кр}$. Характерной особенностью асинхронных ИД является то, что у них $s_{кр}>1$.

Механические характеристики $M=f(s)$ асинхронных двигателей общего назначения (кривая I) и исполнительных (кривые II и III) при симметричном питании (круговом вращающемся магнитном поле) показаны на рис. 67. Из рисунка видно, что при $s_{кр}>1$ обеспечивается устойчивая работа ИД во всем диапазоне двигательного режима ($0\leqslant s\leqslant 1$). Причем чем больше $s_{кр}$, тем ближе к линейной получается механическая характеристика. В современных асинхронных ИД $s_{кр}=2\div8$.

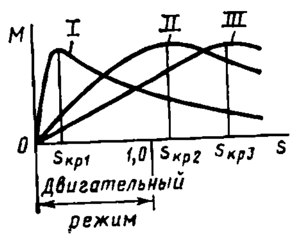


Рис. 67. Механические характеристики асинхронных двигателей:
I — общего назначения, II, III — исполнительного

Асинхронные ИД выпускают мощностью от долей ватта до нескольких сотен ватт как для промышленной (50 Гц), так и для повышенной (200, 400, 500, 1000 Гц) частоты питающего напряжения.

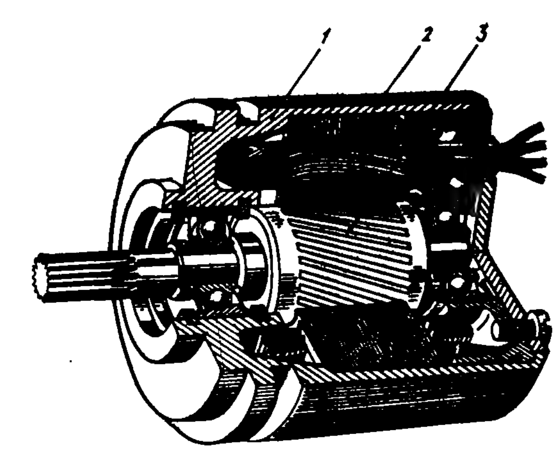


Рис. 68. Асинхронный исполнительный двигатель ДКИ:
1 — корпус, 2 — статор, 3 — ротор

Конструкция асинхронного ИД серии ДКИ с короткозамкнутым ротором, имеющим обмотку в виде «беличьей клетки», показана на рис. 68. Статор ИД принципиально не отличается от статора обычного АД. В пазах статора размещены две обмотки, сдвинутые в пространстве на $90°/p$. При работе двигателя на одну обмотку, называемую *обмоткой возбуждения* ОВ, напряжение подается постоянно, а на другую, называемую *обмоткой управления* ОУ, — только при вращении ротора.

Двигатели ДКИ имеют «сквозную» конструкцию, при которой внутренний диаметр сердечника статора равен наружному диаметру подшипников. Такая конструкция позволяет произвести механическую обработку расточки статора и отверстий под подшипники с одного установа и тем самым получить малый воздушный зазор $\delta=0{,}03\div0{,}05$ мм. Последнее обстоятельство способствует уменьшению магнитного сопротивления, увеличению вращающего момента, уменьшению намагничивающего тока, а следовательно, повышению коэффициента мощности и снижению электрических потерь в двигателе.

Недостатком ИД с короткозамкнутой обмоткой типа «беличья клетка» является наличие массивного ротора с большим моментом инерции $J_р$. Поэтому электромеханическая постоянная времени $T_м\sim J_р/M_п$ у таких двигателей достаточно велика ($T_м=0{,}2\div1{,}5$ с) и быстродействие невысокое.

Наиболее распространенными малоинерционными ИД переменного тока в настоящее время являются асинхронные двигатели с полым немагнитным ротором. Такой двигатель серии АДП показан на рис. 69.

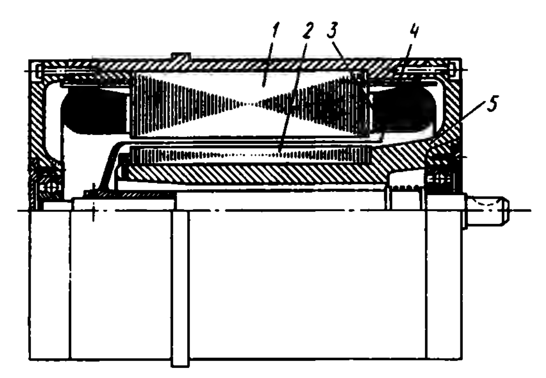


Рис. 69. Асинхронный исполнительный двигатель АДП:
1, 2 — внешний и внутренний статоры, *3* — обмотка статора, *4* — полый ротор, *5* — подшипниковый щит

Двигатель имеет два статора *1* (внешний) и *2* (внутренний), которые набирают из листов электротехнической стали или пермаллоя. Внутренний статор, служащий для уменьшения магнитного сопротивления на пути основного магнитного потока, размещают на цилиндрическом выступе одного из подшипниковых щитов *5*. Полый ротор *4* двигателя выполняют в виде тонкостенного стакана из немагнитного материала (чаще всего из сплавов алюминия). Толщина стенок ротора зависит от мощности ИД и составляет 0,2—1 мм. Малый момент инерции ротора позволяет уменьшить электромеханическую постоянную времени ($T_м=0{,}005\div0{,}15$ с) и значительно повысить быстродействие ИД.

Двухфазную обмотку *3* статора чаще всего выполняют в виде двух раздельных обмоток (возбуждения и управления), которые обычно располагают в пазах внешнего статора. В двигателях мощностью $P_{2ном}<1$ Вт обмотки удобнее размещать на внутреннем статоре, а в двигателях мощностью $P_{2ном}>100$ Вт — одну на внешнем, а другую на внутреннем статорах.

Конструктивной особенностью ИД с полым немагнитным ротором является большой немагнитный промежуток на пути рабочего потока, состоящий из двух воздушных зазоров (между внешним статором и ротором $\delta_1=0{,}1\div0{,}25$ мм; между ротором и внутренним статором $\delta_2\approx\delta_1$) и толщины стенки стакана ротора. Таким образом, суммарный немагнитный промежуток между внешним и внутренним статорами составляет 0,4—1,5 мм. Из-за большого немагнитного промежутка ИД с полым немагнитным ротором потребляют большой намагничивающий ток (0,8—0,9 номинального) и, следовательно, имеют низкий коэффициент мощности, большие электрические потери и малый кпд.

Принцип действия. Для преобразования асинхронным ИД электрического сигнала управления в механическое перемещение вала необходимо создать в двигателе вращающееся магнитное поле, которое возникает, если токи в обмотках возбуждения и управления сдвинуты по фазе во времени.

Напомним, что наилучшие энергетические показатели двигатели переменного тока имеют при круговом вращающемся поле, которое получается в двухфазных машинах при сдвиге токов в

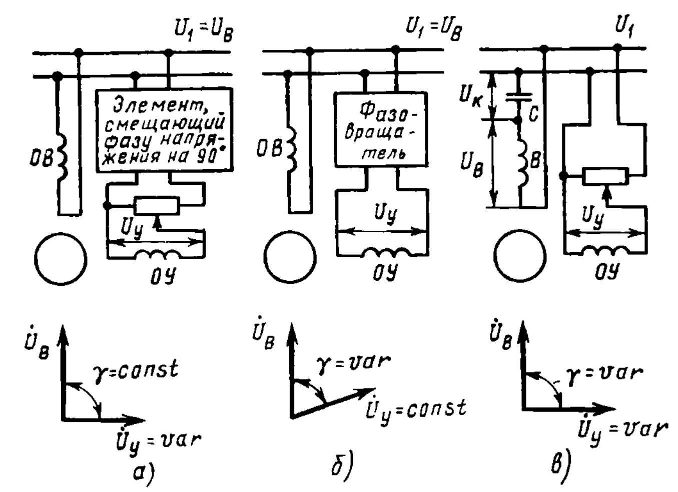


Рис. 70. Управление асинхронным ИД:
а — амплитудное, *б* — фазовое, *в* — амплитудно-фазовое

обмотках на четверть периода ($\gamma=\pi/2$) и равенстве мдс обмоток ($I_в w_{в.\,эф}=I_у w_{у.\,эф}$). Для обеспечения сдвига токов в обмотках применяют специальные схемы управления, фазовращатели или конденсаторы.

На практике управление ИД осуществляют одним из трех способов: изменением амплитуды напряжения управления при неизменной его фазе (амплитудное управление); изменением фазы напряжения управления при неизменной его амплитуде (фазовое управление); одновременным изменением амплитуды и фазы напряжения управления (амплитудно-фазовое управление).

При *амплитудном управлении* (рис. 70, *а*) обмотку возбуждения *ОВ* подключают непосредственно к сети переменного тока $U_в=U_1$, а на обмотку управления *ОУ* подают сигнал — напряжение управления $U_у$, сдвинутое во времени схемой управления относительно напряжения возбуждения $U_в$ на угол $\gamma=90°$. Отношение действующих значений напряжения управления и напряжения возбуждения называется *коэффициентом сигнала* $\alpha=U_у/U_в$. Если обмотки *ОВ* и *ОУ* имеют разное число витков, то используют *эффективный коэффициент сигнала* $\alpha_e=\alpha k$, где $k=w_{в.\,эф}/w_{у.\,эф}$ — отношение эффективных чисел витков обмоток *ОВ* и *ОУ*.

В процессе работы ИД амплитуда напряжения управления может изменяться. Круговое вращающееся поле при амплитудном управлении имеет место только при $\alpha_e=1$. Напряжение управления, соответствующее этому случаю, считается номинальным. При всех других напряжениях управления (кроме $U_у=0$) в двигателе образуется эллиптическое вращающееся поле. При $U_у=0$ поле пульсирующее.

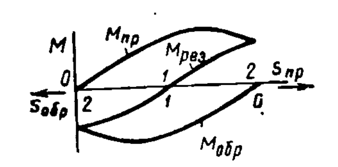


Рис. 71. Механическая характеристика асинхронного ИД при отсутствии сигнала управления:

1, 2 — рабочие точки

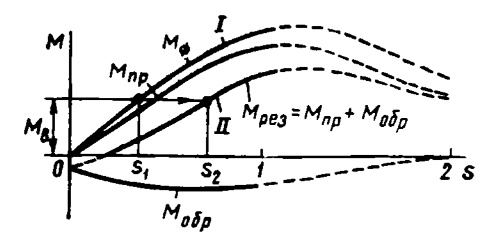


Рис. 72. Механические характеристики асинхронного ИД:

I — при круговом поле, *II* — при эллиптическом поле

При отсутствии управляющего сигнала ($U_у=0$) асинхронный ИД является «чисто» однофазным и создает как вращающий $M_{пр}$, так и тормозной $M_{обр}$ моменты. При одинаковых скольжениях ($s_{пр}=s_{обр}$) $M_{пр}=-M_{обр}$. Поскольку в асинхронных ИД $s_{кр.\,пр}=s_{кр.\,обр}>1$, результирующий момент $M_{рез}=M_{пр}+M_{обр}$ в зоне скольжений двигательного режима ($0\leqslant s\leqslant 1$) получается отрицательным (рис. 71). Таким образом, при снятии управляющего сигнала асинхронный ИД останавливается, т. е. не имеет самохода.

При *фазовом управлении* (см. рис. 70, *б*) обмотку возбуждения, так же как и при амплитудном управлении, включают в сеть, а на обмотку управления подают изменяющееся по фазе, но постоянное по амплитуде напряжение $U_у=U_в/k$. Управление ИД осуществляют изменением фазы напряжения управления — изменением угла γ. Значение сигнала управления оценивается коэффициентом сигнала, за который в этом случае принимают $\sin\gamma$.

Круговое вращающееся поле при фазовом управлении образуется в ИД лишь при сдвиге напряжений $U_в$ и $U_у$ по фазе на 90° ($\sin\gamma=1$). При других значениях коэффициента сигнала ($0<\sin\gamma<1$) вращающееся поле становится эллиптическим, а при $\sin\gamma=0$ — пульсирующим.

При *амплитудно-фазовом* управлении изменяется как амплитуда напряжения управления, так и его угол сдвига по отношению к напряжению возбуждения. Такому способу управления соответствует часто используемая на практике схема включения конденсаторного ИД (см. рис. 70, *в*). Обычно емкость конденсатора, включаемого последовательно с обмоткой возбуждения, выбирают так, чтобы при номинальном напряжении управления $U_{у.\,ном}=U_в/k$ и неподвижном роторе ($n_2=0$) токи в обмотках были сдвинуты на 90°. При выполнении этих условий круговое вращающееся поле получается лишь в одном, но наиболее частом режиме работы ИД — режиме пуска. В других режимах работы и при всех напряжениях управления (кроме $U_у=0$), отличных от номинального, образуется эллиптическое вращающееся поле. При $U_у=0$ поле пульсирующее.

При всех способах управления частота вращения ротора асинхронных ИД меняется за счет изменения степени эллиптичности вращающегося магнитного поля. Если необходимо уменьшить частоту вращения ротора, изменяют коэффициент сигнала так, чтобы магнитное поле из кругового превратилось в эллиптическое (рис. 72). При этом происходит уменьшение прямовращающегося поля (уменьшение вращающего момента $M_{пр}$) и увеличение обратновращающегося поля (возрастание тормозного момента $M_{обр}$). При постоянном внешнем моменте сопротивления новый установившийся режим ($M_в=M_{рез}$) будет при бóльшем скольжении s_2 (при меньшей частоте вращения ротора).

Недостатком описанных способов регулирования частоты вращения ротора является малая их экономичность, что объясняется большими электрическими потерями в обмотках статора и ротора из-за наличия обратновращающегося магнитного поля.

§ 25. Исполнительные двигатели постоянного тока

Исполнительные двигатели постоянного тока в зависимости от способа возбуждения подразделяют на двигатели с электромагнитным возбуждением и с возбуждением от постоянных магнитов. В исполнительных двигателях постоянного тока с электромагнитным возбуждением в отличие от ДПТ общепромышленного назначения сердечник статора набирают из листов электротехнической стали для уменьшения вихревых токов, возникающих в результате изменения магнитных потоков при изменении управляющих сигналов.

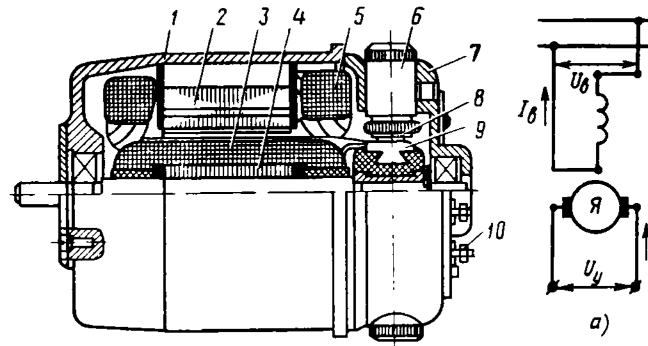


Рис. 73. Исполнительный двигатель постоянного тока серии СЛ:

1 — корпус, *2, 4* — сердечники статора и ротора, *3* — обмотка якоря, *5* — обмотка возбуждения, *6* — щеткодержатель, *7* — подшипниковый щит, *8* — щетки, *9* — коллектор, *10* — выводные зажимы

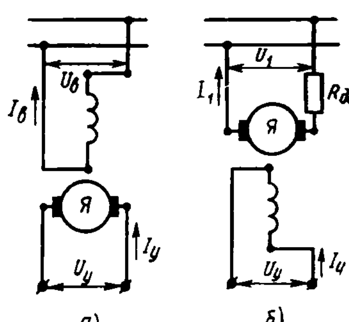


Рис. 74. Схемы включения ИД постоянного тока с якорным (*а*) и полюсным (*б*) управлением

Устройство ИД постоянного тока с электромагнитным возбуждением серии СЛ показано на рис. 73. Сердечник статора *2* набран из листов электротехнической стали. Двигатель имеет трубчатые щеткодержатели *6* и коллектор *9* на пластмассе. Для повышения линейности механических и регулировочных характеристик двигатель выполнен с ненасыщенной магнитной цепью.

В двигателях с электромагнитным возбуждением напряжение (сигнал) управления может подаваться либо на обмотку ротора — двигатели с якорным управлением (рис. 74, *а*), либо на обмотку полюсов — двигатели с полюсным управлением (рис. 74, *б*). Якорное управление по существу аналогично регулированию частоты вращения обычных двигателей постоянного тока изменением напряжения (см. рис. 61, *а*), а полюсное управление — изменением потока возбуждения (см. рис. 61, *б*).

Основным недостатком рассмотренных ИД постоянного тока является сравнительно малое быстродействие (большая электромеханическая постоянная времени $T_м=0,1\div0,5$ с), что объясняется значительным моментом инерции сердечника ротора с обмоткой якоря.

В последние годы в автоматических устройствах получили распространение малоинерционные ИД постоянного тока. Устройство такого двигателя серии ДПР показано на рис. 75. Корпус двигателя *1*, являющийся одновременно магнитопроводом внешнего статора, представляет собой цилиндр из магнитно-мягкой стали, в котором выполнены закрытые защитной стальной лентой *5* окна для доступа к щеточно-коллекторному узлу *4*. К корпусу винтами крепятся подшипниковые щиты и кольцевой постоянный магнит *3*, образующий внутренний статор. Внутри неподвижного магнита проходит вал из нержавеющей стали, на который напрессован на накатке коллектор, изготовленный из меди и опрессованный пластмассой. Обмотка *2* якоря простая петлевая, выполнена из мягких секций, намотанных медным проводом с эмалевой изоляцией, и пропитана термореактивным компаундом на основе эпоксидной смолы. После формовки и полимеризации (затвердевания) пропиточного компаунда якорь представляет собой монолитный полый стакан. Концы секций обмотки якоря соединены с пластинами коллектора, который является частью дна стакана.

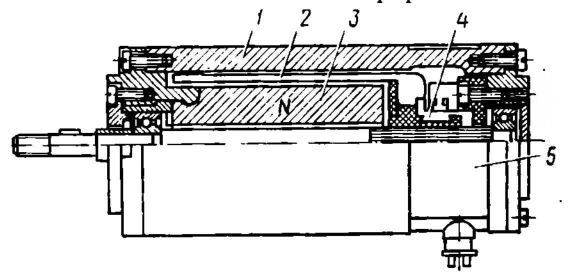


Рис. 75. Малоинерционный ИД постоянного тока серии ДПР:

1 — корпус, *2* — обмотка якоря, *3* — постоянный магнит, *4* — щеточно-коллекторный узел, *5* — защитная лента

Момент инерции полого ротора значительно меньше момента инерции обычного якоря, поэтому такие двигатели имеют высокое быстродействие (небольшую постоянную времени $T_м=0,015\div0,02$ с).

Недостатком двигателей серии ДПР является наличие между внешним и внутренним статорами большого немагнитного промежутка, который требует бо́льшей мдс для создания потока возбуждения, а следовательно, приводит к возрастанию габаритов двигателя за счет увеличения объема постоянных магнитов.

Однако двигатели с полым якорем вследствие отсутствия магнитных потерь в стали сердечника ротора и электрических потерь в обмотке возбуждения имеют высокий кпд. Хорошие энергетические показатели таких двигателей обусловили их широкое применение в автоматических системах на судах и летательных аппаратах.

§ 26. Шаговые исполнительные двигатели

Устройство. Электрические микромашины, преобразующие импульсы напряжения управления в дискретные (скачкообразные) угловые перемещения ротора с последующей его фиксацией в заданном положении, называют *шаговыми исполнительными двигателями*.

Эти двигатели представляют собой многополюсные многофазные синхронные микродвигатели реактивного типа или с возбуждением от постоянных магнитов без пускового устройства. Шаговый двигатель серии ШД сквозной конструкции показан на рис. 76. Сердечник *2* статора, набранный из листов электротехнической стали, расположен в алюминиевом корпусе *1*. В пазах статора уложена двухслойная четырехфазная обмотка *4* с числом пазов на полюс и фазу $q=1$. Такая сосредоточенная обмотка

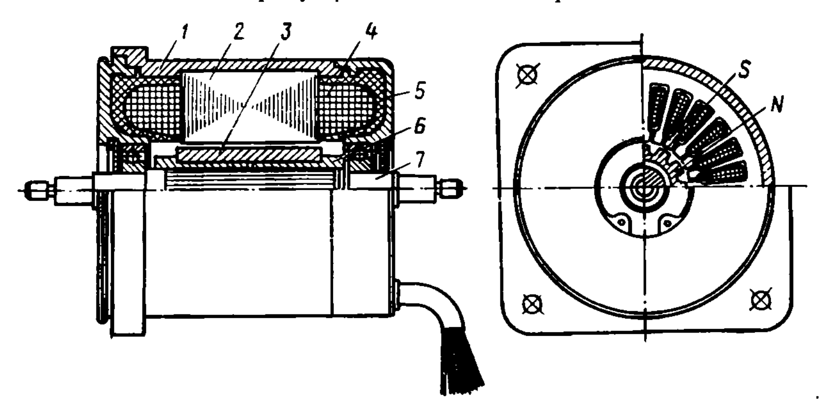


Рис. 76. Шаговый исполнительный двигатель серии ШД:

1 — корпус, *2* — сердечник статора, *3* — ротор, *4* — обмотка управления, *5* — подшипниковый щит, *6* — втулка, *7* — вал

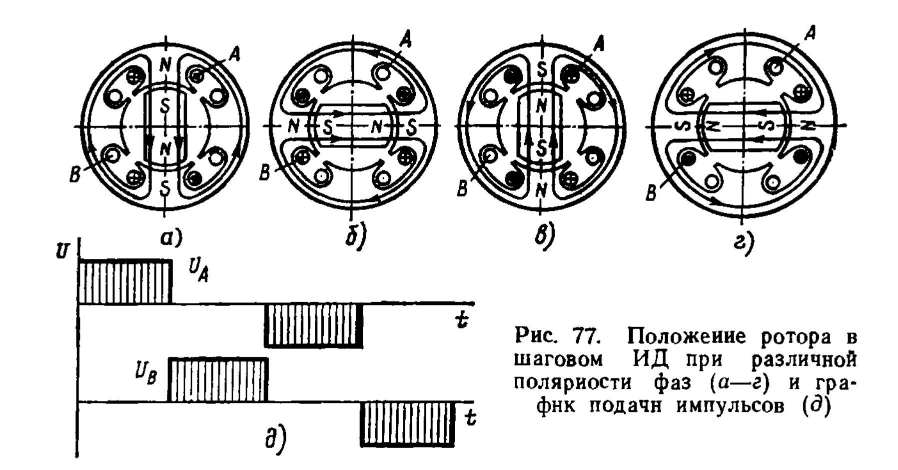


Рис. 77. Положение ротора в шаговом ИД при различной полярности фаз (*а—г*) и график подачи импульсов (*д*)

при прохождении по ней тока создает магнитное поле с числом полюсов, равным числу полюсов ротора. Ротор *3* выполнен в виде многополюсной звездочки из магнитно-твердого сплава (постоянных магнитов), укрепленной на валу *7* алюминиевой втулкой *6*. Статор вместе с подшипниковыми щитами *5* залит эпоксидным компаундом, герметизирующим обмотку управления.

Принцип действия. Питание обмотки статора в шаговых двигателях осуществляется подачей прямоугольных импульсов напряжения от электронного коммутатора. Под воздействием такого импульса ротор двигателя совершает определенное угловое перемещение, называемое *шагом*.

Рассмотрим принцип действия шагового ИД на примере упрощенного двухполюсного двигателя с двухфазной обмоткой управления (рис. 77). Две катушки, образующие каждую фазу такого двигателя, размещены на явновыраженных диаметрально расположенных полюсах статора. На роторе находится двухполюсный магнит.

В рассматриваемом двигателе магнитное поле статора может иметь четыре различных состояния, которым соответствуют различные направления тока в фазах *A* и *B*: ток в фазе *A* направлен от начала к концу, фаза *B* обесточена (рис. 77, *а*); ток в фазе *B* направлен от начала к концу, фаза *A* обесточена (рис. 77, *б*); ток в фазе *A* направлен от конца к началу, фаза *B* обесточена (рис. 77, *в*); ток в фазе *B* направлен от конца к началу, фаза *A* обесточена (рис. 77, *г*).

При последовательной подаче управляющих импульсов напряжения (рис. 77, *д*) на фазы обмотки статора происходит скачкообразное перемещение оси магнитного потока на 90°. В результате под действием синхронизирующего момента, обусловленного взаимодействием магнитного потока статора Φ_1 и потока ротора $\Phi_м$, ротор при каждом импульсе поворачивается также на 90°, т. е. делает шаг, равный 90°. В общем случае в многополюсном многофазном двигателе угол поворота (шаг) ротора $\alpha_ш = 360°/(2pm)$.

Шаговые исполнительные двигатели широко применяют в системах автоматического контроля, управления и регулирования, в роботах и манипуляторах, в устройствах измерения времени.

Контрольные вопросы

1. Назовите типы исполнительных двигателей.
2. Чем отличается исполнительный асинхронный двигатель от обычного?
3. Каково назначение внутреннего статора в асинхронном исполнительном двигателе с полым немагнитным ротором?
4. Какие способы управления исполнительными двигателями переменного и постоянного тока вы знаете?
5. Каковы особенности конструкции малоинерционных двигателей?
6. Объясните принцип действия шагового двигателя.

ГЛАВА VI. ТАХОГЕНЕРАТОРЫ

§ 27. Общие сведения

Электрические микромашины, предназначенные для преобразования механического перемещения (вращения вала) в электрический сигнал (выходное напряжение), называют *тахогенераторами*. Тахогенераторы (ТГ) относят к группе информационных электрических микромашин.

Основное требование, предъявляемое к тахогенераторам, — *линейность выходной характеристики*, т. е. строгая пропорциональность между выходным напряжением $U_{тг}$ и частотой вращения ротора n:

$$U_{тг} = k_U n, \tag{68}$$

где k_U — постоянная, называемая *крутизной выходной характеристики*.

Другими требованиями, предъявляемыми к ТГ, являются: большая крутизна выходной характеристики $k_U = U_{тг}/n$; минимальная остаточная эдс E_0, т. е. отсутствие выходного сигнала при неподвижном роторе ($n=0$); минимальная зона нечувствительности, т. е. способность выдавать электрический сигнал при очень малых оборотах ротора n_{min}; стабильность выходной характеристики, т. е. малая зависимость выходного напряжения от условий окружающей среды; симметрия выходной характеристики — постоянство выходного напряжения при вращении ротора в различных направлениях с одинаковыми частотами вращения; максимальная выходная мощность при минимальной мощности возбуждения; малые момент инерции ротора и момент сопротивления ТГ; минимальные габариты и масса при высокой надежности.

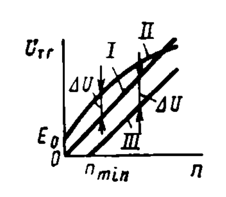


Рис. 78. Выходные характеристики тахогенераторов:
I — идеальная, *II* — асинхронная ТГ, *III* — ТГ постоянного тока

На рис. 78 показаны идеальная *I* и возможные реальные *II, III* выходные характеристики тахогенераторов. Отклонение реальных выходных характеристик от идеальной (прямолинейной) называется ***амплитудной погрешностью*** тахогенератора (ΔU). В зависимости от назначения ТГ и класса точности максимальная амплитудная погрешность $\Delta U_{max} = 0{,}02 \div 3\%$.

Тахогенераторы используют в технике для различных целей: измерения частоты вращения; осуществления обратных связей по скорости в системах автоматического регулирования; выполнения электрического дифференцирования и интегрирования в схемах счетно-решающих устройств. Тахогенераторы могут быть переменного (асинхронные, синхронные) и постоянного тока.

§ 28. Асинхронный тахогенератор

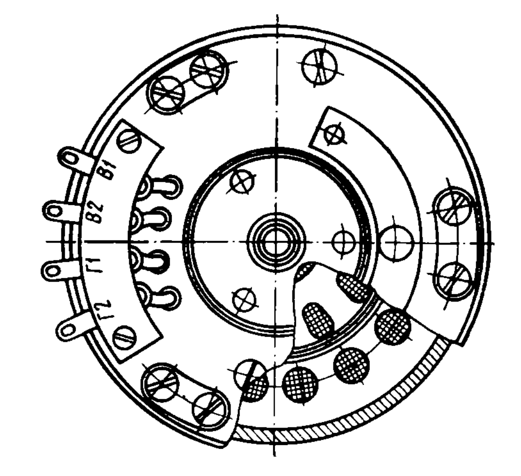
Устройство. Асинхронный ТГ представляет собой индукционную двухфазную микромашину с полым немагнитным ротором, работающую в режиме генератора. Его устройство (рис. 79) принципиально мало отличается от асинхронного исполнительного двигателя с полым ротором.

Магнитопровод асинхронного ТГ содержит внешний *1* и внутренний *4* статоры, набранные из листов электротехнической стали или пермаллоя. Для снижения потерь в стали от вихревых токов и получения симметричной во всех радиальных направлениях магнитной системы листы тщательно изолируют друг от друга и собирают веером, т. е. смещают каждый последующий лист относительно предыдущего на одно зубцовое деление.

В пазах статоров размещают две сдвинутые в пространстве на электрический угол 90° однофазные обмотки *2* и *5*: одну из обмоток, называемую обмоткой возбуждения ОВ, подключают к сети переменного тока, с другой обмотки, называемой выходной или генераторной ОГ, снимают выходное напряжение. Обмотки в асинхронных ТГ могут располагаться либо на внешнем, либо на внутреннем статоре, или одна обмотка (чаще генераторная) на внешнем статоре, а другая (обмотка возбуждения) на внутреннем.

Ротор *3* асинхронного ТГ выполняют в виде полого тонкостенного стакана из материала с бóльшим активным сопротивлением, чем ротор исполнительного двигателя. Его изготовляют из сплавов константана, манганина, фосфористой или марганцовистой бронзы, т. е. материалов, большое активное сопротивление которых мало меняется при изменении температуры.

Концы обмоток выводят на контактную плату *7*, укрепленную на подшипниковом щите *6*, и обозначают *В1*, *В2* (обмотка возбуждения) и *Г1*, *Г2* (генераторная обмотка).



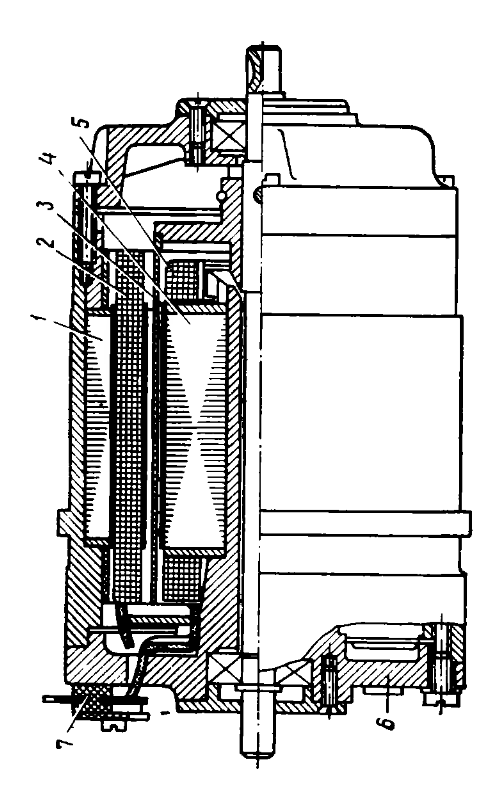


Рис. 79. Асинхронный тахогенератор:
1, 4 — внешний и внутренний статоры, *2* — генераторная обмотка, *3* — полый ротор, *5* — обмотка возбуждения, *6* — подшипниковый щит, *7* — контактная плата

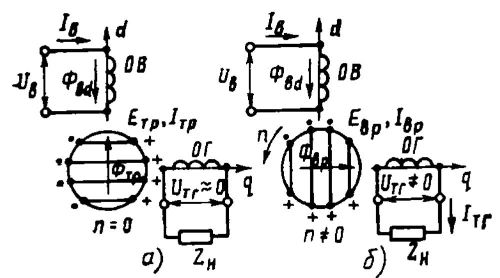


Рис. 80. К принципу действия асинхронного ТГ

Принцип действия. При подключении обмотки возбуждения к сети по ней проходит переменный ток возбуждения $I_в$, который создает магнитный поток $Ф_{вd}$, пульсирующий по продольной оси d (рис. 80).

Если ротор неподвижен ($n=0$), производящий его поток $Ф_{вd}$ наводит в нем эдс трансформации $E_{тр}$. Поскольку полый ротор короткозамкнут «сам на себя», то под действием эдс трансформации в роторе проходят вихревые токи $I_{тр}$, контуры которых располагаются в плоскостях, перпендикулярных потоку возбуждения. Направление токов $I_{тр}$ определяется *правилом Ленца:* они создают поток ротора $Ф_{тр}$, который направлен навстречу потоку возбуждения (рис. 80, *а*). Размагничивающее действие потока $Ф_{тр}$ компенсируется (как это имеет место в обычном трансформаторе) возрастанием тока в обмотке возбуждения, который восстанавливает почти прежнее значение продольного потока $Ф_{вd}$.

Таким образом, при неподвижном роторе в тахогенераторе существует только продольный магнитный поток, который не сцеплен с перпендикулярно расположенной ему генераторной обмоткой и не наводит в ней эдс. Следовательно, при $n=0$ $U_{тг}=0$.

При вращении ротора ($n\neq0$) его «проводники-волокна» пересекают силовые линии потока возбуждения и в них, кроме эдс трансформации, наводится еще эдс вращения $E_{вр}$. Направление эдс вращения определяется правилом правой руки (рис. 80, *б*). Под действием этой эдс по ротору проходят токи $I_{вр}$, контуры которых при большом активном сопротивлении ротора практически параллельны оси потока возбуждения, т. е. перпендикулярны поперечной оси q.

Токи $I_{вр}$ создают магнитный поток ротора $Ф_{вр}$, направление которого определяется правилом буравчика. Пульсирующий поток ротора $Ф_{вр}$ направлен по оси генераторной обмотки и, сцепляясь с ее витками, наводит в ней выходную эдс тахогенератора $E_{тг}$.

Так как поток $Ф_{вd}$ пульсирует с частотой сети f_1, то и индуцируемые им токи и потоки ротора, а следовательно, и выходная эдс изменяются с частотой сети, т. е. их частота не зависит от частоты вращения ротора. Однако значения тока $I_{вр}$, потока $Ф_{вр}$ и эдс генераторной обмотки тем больше, чем быстрее вращается ротор. Таким образом, выходное напряжение асинхронного ТГ пропорционально частоте вращения ротора:

$$U_{тг}=E_{тг}=k_U n, \qquad (69)$$

где крутизна выходной характеристики k_U зависит от параметров тахогенератора (в современных асинхронных ТГ $k_U=1\div10$ мВ·мин/об).

В действительности выходная характеристика асинхронного ТГ не является линейной (см. рис. 78), что объясняется многими причинами: несимметрией магнитной цепи (неравенство магнитных проводимостей в различных радиальных направлениях); неравномерностью воздушного зазора; неодинаковой толщиной стенок стакана ротора; наличием магнитных потоков рассеяния. В результате этих причин в генераторной обмотке тахогенератора даже при неподвижном роторе наводится остаточная эдс E_0 (у современных асинхронных ТГ $E_0=25\div100$ мВ).

Достоинствами асинхронного ТГ являются: независимость частоты выходного напряжения от частоты вращения; отсутствие скользящих контактов; малый момент сопротивления благодаря немагнитному ротору (на немагнитный материал не действуют аксиальные и радиальные силы магнитного тяжения); высокая надежность, хорошая стабильность выходной характеристики.

К недостаткам асинхронного ТГ относят: нелинейность выходной характеристики; малую выходную мощность; низкий коэффициент мощности из-за большого немагнитного зазора; наличие остаточной эдс и фазовой погрешности; большие габариты и массу.

§ 29. Синхронный тахогенератор

Устройство. Синхронный ТГ представляет собой однофазный или трехфазный генератор небольшой мощности с возбуждением от постоянных магнитов (рис. 81).

Статор *1* синхронного ТГ практически не отличается от статоров асинхронных микромашин переменного тока. При однофазной обмотке якоря, называемой выходной, ее проводники занимают $^2/_3$ пазов статора. На роторе размещены постоянные магниты *3* обычно звездообразной формы, которые крепят на валу заливкой алюминиевым сплавом. Одновременно заливают и междуполюсное пространство ротора. Образующиеся при этом стержни *4* используют в качестве демпферной обмотки.

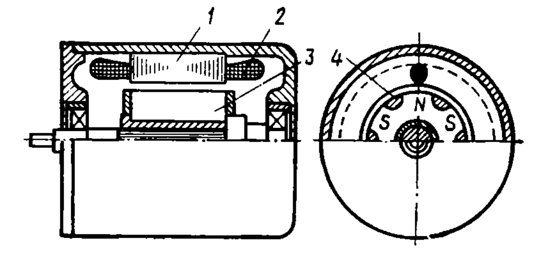


Рис. 81. Синхронный ТГ с возбуждением от постоянных магнитов:
1 — статор, *2* — выходная обмотка, *3* — постоянный магнит, *4* — демпферные стержни

Принцип действия. При вращении ротора ТГ силовые линии потока постоянных магнитов $Ф_м$ пересекают проводники обмотки статора и индуцируют в них пере-

менную эдс вращения, значение которой зависит от частоты вращения ротора n:

$$E_{тг}=k_e\Phi_м n, \quad (70)$$

где k_e — постоянная, определяемая обмоточными данными ТГ.

Из выражения (70) следует, что выходная эдс синхронного ТГ пропорциональна частоте вращения ротора. Однако с изменением этой частоты изменяется частота выходной эдс $f_{тг}=pn/60$, где p — число пар полюсов.

Известно, что реактивное индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте ($X_L\sim f$), а реактивное емкостное сопротивление обратно пропорционально ей ($X_C\sim 1/f$). Поэтому при изменении частоты вращения ротора будут изменяться полное сопротивление обмотки статора и сопротивление внешней цепи (нагрузки). В результате выходная характеристика синхронного ТГ становится нелинейной; точность работы тахогенератора снижается. К достоинствам синхронного ТГ относят: большую выходную мощность при малых габаритах и бесконтактность при возбуждении от постоянных магнитов.

В синхронных ТГ информацию о частоте вращения ротора содержит не только эдс, но и ее частота, поэтому эти ТГ широко используют в схемах автоматики.

§ 30. Тахогенератор постоянного тока

Устройство. Тахогенератор постоянного тока представляет собой небольшую коллекторную электрическую машину, работающую в режиме генератора. По конструкции он принципиально не отличается от обычных микромашин постоянного тока с независимым возбуждением. В современных ТГ постоянного тока вместо обмотки возбуждения часто применяют постоянные магниты.

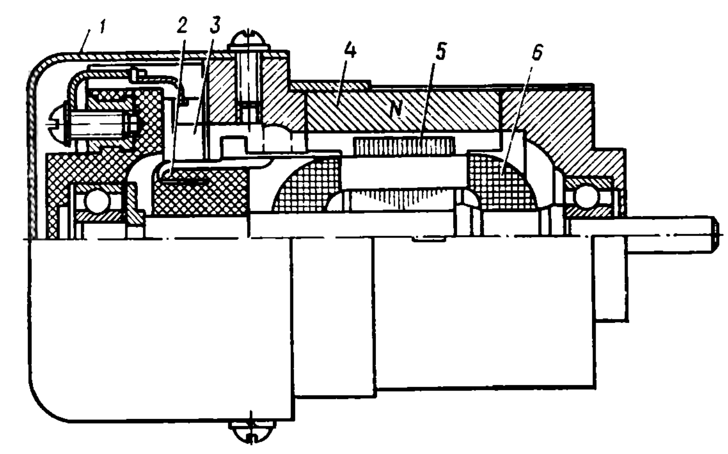


Рис. 82. Тахогенератор постоянного тока с постоянными магнитами:
1 — кожух, 2 — коллекторные пластины, 3 — щетки, 4 — магнит, 5 — ротор, 6 — обмотка якоря

Устройство ТГ постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов показано на рис. 82. Постоянные магниты *4* в виде скоб или брусков расположены на статоре между подшипниковыми щитами. В пазах пакета ротора *5*, набранного из листов электротехнической стали, уложена обмотка *6* якоря. Концы секций обмотки выведены на медные коллекторные пластины *2*, запрессованные в пластмассу. К коллектору прижаты щетки *3*. Чтобы уменьшить погрешности тахогенератора, вносимые контактом коллектор — щетки, и снизить переходное сопротивление, применяют медно-графитные или серебряно-графитные щетки, а для прецизионных тахогенераторов счетно-решающих устройств — щетки с серебряными и золотыми напайками. Щетки вставляют в щеткодержатели, располагаемые, как правило, в подшипниковом щите.

Существенным недостатком ТГ постоянного тока является наличие пульсаций выходного напряжения, обусловленных магнитной несимметрией, зубчатостью ротора, эллиптичностью коллектора. Для уменьшения пульсаций увеличивают воздушный зазор, обрабатывают цилиндрические поверхности вала, ротора, подшипниковых щитов, коллектора по высокому классу точности, применяют веерную сборку пакета якоря и т. п. Однако несмотря на перечисленные меры, полностью устранить пульсации выходного напряжения у ТГ постоянного тока обычной конструкции не удается. Поэтому в последние годы все чаще применяют конструкцию ТГ, аналогичную конструкции малоинерционного двигателя постоянного тока с полым ротором (см. § 25), в которой пульсации напряжения значительно меньше.

Принцип действия. В магнитоэлектрическом ТГ источником магнитного поля являются постоянные магниты, создающие в машине постоянный магнитный поток $\Phi_м$. При вращении ротора в проводниках обмотки якоря в соответствии с законом электромагнитной индукции наводится эдс вращения, являющаяся выходной эдс тахогенератора $E_{тг}$ (рис. 83). Направление эдс определяется правилом правой руки, а ее значение пропорционально частоте вращения ротора n:

$$E_{тг}=c_e\Phi_м n, \quad (71)$$

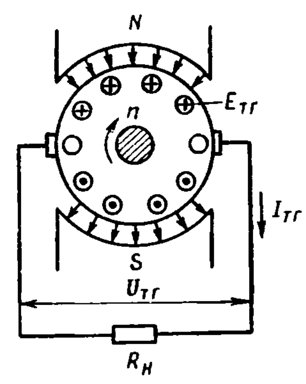


Рис. 83. К принципу действия ТГ постоянного тока

где c_e — постоянная, определяемая обмоточными данными ТГ.

При холостом ходе ТГ ($R_н=\infty$) выходное напряжение $U_{тг}=E_{тг}$; при нагрузке ($I_{тг}\neq 0$) напряжение ТГ отличается от эдс на значения падений напряжения на сопротивлении обмотки якоря $I_{тг}R_{тг}$ и на щеточном контакте $\Delta U_щ$: $U_{тг}=E_{тг}-I_{тг}R_{тг}-\Delta U_щ$.

Учитывая формулу (71) и выразив ток якоря согласно закону Ома через напряжение на выходе ТГ и сопротивление нагрузки $R_н$ ($I_{тг}=U_{тг}/R_н$), получим $U_{тг}=c_e\Phi_М n-(U_{тг}/R_н)R_{тг}-\Delta U_щ$, отсюда выходное напряжение ТГ

$$U_{тг}=c_e\Phi_М n/(1+R_{тг}/R_н)-\Delta U_щ/(1+R_{тг}/R_н). \quad (72)$$

Если пренебречь падением напряжения на щеточном контакте (принять $\Delta U_щ=0$), то при постоянных $\Phi_М$, $R_{тг}$ и $R_н$ выходное напряжение ТГ будет строго пропорционально частоте вращения ротора: $U_{тг}=c_e\Phi_М n/(1+R_{тг}/R_н)=k_U n$, где $k_U=c_e\Phi_М/(1+R_{тг}/R_н)$ — крутизна выходной характеристики (у современных ТГ постоянного тока $k_U=5\div 100$ мВ·мин/об).

Из формулы (72) видно, что чем больше $\Phi_М$ и $R_н$ и меньше $R_{тг}$, тем больше крутизна выходной характеристики. Наибольшая крутизна имеет место при холостом ходе ($R_н=\infty$).

В реальном ТГ $\Delta U_щ\neq 0$, поэтому выходная характеристика пересекает ось абсцисс при $n=n_{min}$. Вследствие падения напряжения на щеточном контакте у ТГ появляется зона нечувствительности — зона частот вращения от $n=0$ до $n=n_{min}$, при которых выходное напряжение равно нулю (см. рис. 78). Границу зоны нечувствительности n_{min} можно найти из формулы (72), подставив в нее $U_{тг}=0$: $n_{min}=\Delta U_щ/c_e\Phi_М$.

Наличие скользящего щеточного контакта является причиной недостатков ТГ постоянного тока, к основным из которых относят: нестабильность выходной характеристики вследствие изменения переходного сопротивления скользящих контактов; появление зоны нечувствительности; несимметрию выходной характеристики (неравенство напряжений при вращении ротора в различных направлениях); пульсацию выходного напряжения; необходимость установки фильтров от радиопомех; малую надежность.

Достоинствами ТГ постоянного тока являются: меньшие габариты и масса по сравнению с ТГ переменного тока; отсутствие источника питания при использовании постоянных магнитов; отсутствие фазовой погрешности.

Выбор того или иного типа тахогенератора зависит от его назначения в схемах автоматических устройств и условий окружающей среды.

Контрольные вопросы

1. Какие электрические машины называют тахогенераторами?
2. Назовите типы тахогенераторов.
3. Сравните выходные характеристики тахогенераторов различных типов.
4. Каковы достоинства и недостатки тахогенераторов?

ГЛАВА VII. ПОВОРОТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 31. Общие сведения

Электрические микромашины переменного тока, преобразующие механическое перемещение вала (угол поворота ротора) в электрический сигнал (напряжение), находящийся в определенной функциональной зависимости от этого перемещения, называют *поворотными (вращающимися) трансформаторами.*

Поворотные трансформаторы (ПТ) относят к классу информационных электрических микромашин и широко применяют в автоматических и вычислительных устройствах. В системах автоматического регулирования ПТ служат в качестве датчиков и измерителей рассогласования, фиксирующих отклонение системы от некоторого заданного положения. В вычислительных устройствах ПТ применяют для решения геометрических и тригонометрических задач: выполнения различных математических операций, построения треугольников, преобразования координат, разложения и построения векторов.

Поворот ротора ПТ в схемах автоматики осуществляется с помощью редукторного механизма высокой точности, который либо встраивают в корпус машины, либо изготовляют отдельно, а затем соединяют с валом ПТ.

В зависимости от закона изменения выходного напряжения $U_{вых}$ в функции угла поворота ротора α поворотные трансформаторы подразделяют на следующие:

синусный — выходное напряжение которого пропорционально синусу угла поворота ($U_{вых}=k_1\sin\alpha$);

синусно-косинусный — позволяющий получать на выходе два напряжения, одно из которых пропорционально синусу, а другое — косинусу угла поворота ($U_{вых1}=k_1\sin\alpha$, $U_{вых2}=k_1\cos\alpha$);

линейный — выходное напряжение которого прямо пропорционально углу поворота ($U_{вых}=k_2\alpha$);

построитель — выходное напряжение которого связано с двумя входными напряжениями зависимостью

$$U_{вых}=k_3\sqrt{U_{вх\,1}^2+U_{вх\,2}^2}$$

(k_1, k_2 и k_3 — постоянные коэффициенты).

Одним из основных требований, предъявляемых к ПТ, является высокая точность воспроизведения заданных функций. Максимальная погрешность ПТ высокого класса точности не превышает 0,01—0,02%. Такая точность достигается не только особыми конструктивными решениями, но и тщательной технологией изготовления ПТ. Кроме того, магнитная система ПТ выполняется ненасыщенной, т. е. с небольшими плотностями магнитного потока на различных участках магнитной цепи.

Для получения поворотных трансформаторов различных типов можно использовать одну и ту же электрическую машину с двумя

обмотками на статоре и роторе при различных способах их включения.

§ 32. Устройство поворотных трансформаторов

Поворотный трансформатор выполнен конструктивно так же, как асинхронный двигатель с фазным ротором (рис. 84). Он состоит из корпуса *5*, сердечника статора *6* с обмотками *7*, сердечника ротора *8* с обмотками *9*, контактных колец *1* и щеток *2*. Корпус ПТ отливают из сплава алюминия. Сердечники статора и ротора набирают из изолированных листов электротехнической стали или пермаллоя. Для получения магнитопровода с однородными магнитными свойствами применяют веерную сборку пакетов статора и ротора, смещая каждый последующий лист по отношению к предыдущему на одно или несколько зубцовых делений. Для уменьшения влияния высших зубцовых гармоник магнитного поля делают скос пазов ротора на одно зубцовое деление. В пазах статора и ротора ПТ размещают по две одинаковые однофазные, чаще двухполюсные распределенные обмотки, сдвинутые между собой на 90°. Для создания синусоидальной формы распределения магнитного поля обычно применяют так называемые синусные обмотки, в которых число проводников в пазах изменяется по

Рис. 84. Устройство поворотного трансформатора:

1 — контактные кольца, *2* — щетки, *3* — контактная плата, *4* — подшипниковый щит, *5* — корпус, *6* — статор, *7*, *9* — первичные и вторичные обмотки, *8* — ротор

синусоидальному закону. Принципиальная электрическая схема четырехобмоточного ПТ показана на рис. 85.

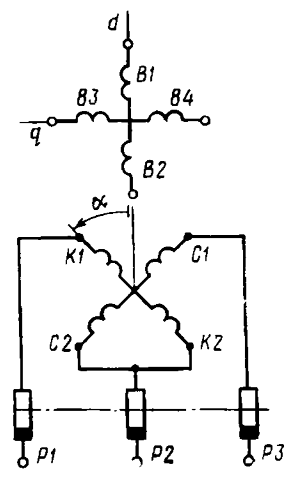


Рис. 85. Принципиальная электрическая схема четырехобмоточного ПТ

Обмотки статора ПТ называют *первичными*, а обмотки ротора — *вторичными*. Выводы обмоток, расположенных на статоре, обозначают *B1*, *B2*, *B3*, *B4*, выводы роторных обмоток — *C1*, *C2* и *K1*, *K2*. Одну из статорных обмоток (*B1—B2*), ось которой является продольной осью *d*, называют *обмоткой возбуждения* (подключают к сети переменного тока), другую (*B3—B4*), ось которой является поперечной осью *q*, — *квадратурной* или *компенсационной*. Схема ее включения зависит от назначения поворотного трансформатора. При отсчете угла поворота ротора от оси обмотки возбуждения роторную обмотку *C1—C2* называют *синусной*, а *K1—K2* — *косинусной*.

Поворотный трансформатор может работать в режиме вращения или поворота ротора. Поэтому электрический контакт с обмотками ротора осуществляют либо с помощью контактных колец и щеток (см. рис. 84), либо спиральных пружин. В последнем случае угол поворота ротора ограничен и не превышает двух оборотов.

С целью уменьшения числа контактных колец концы двух роторных обмоток часто присоединяют к одному общему кольцу и через щетку подводят к общему зажиму (рис. 85). Для уменьшения переходного сопротивления контакта кольца и щетки ПТ обычно изготовляют из сплавов серебра. Зажимы обмоток статора и ротора располагают на контактной плате *3* (см. рис. 84), которая крепится к подшипниковому щиту *4*.

Хотя по конструкции ПТ аналогичен асинхронному двигателю, он не развивает вращающего момента, так как его обмотки получают питание от однофазной сети и создают пульсирующее, а не вращающееся магнитное поле.

В схемах автоматики наряду с рассмотренными выше двухполюсными применяют также многополюсные поворотные трансформаторы. Многополюсные ПТ обладают меньшей погрешностью. Их обычно выполняют плоскими: имеют малую длину и большой диаметр (рис. 86). В многополюсных ПТ высокой точности число пар полюсов достигает 60—120.

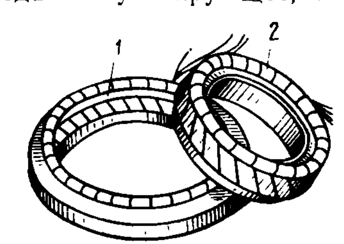


Рис. 86. Многополюсный ПТ:

1 — статор, *2* — ротор

Обмотки в таких ПТ выполняют сосредоточенными. Обычно многополюсные ПТ встраивают непосредственно в какое-либо устройство и поэтому они не имеют подшипниковых щитов. Статор и ротор этих ПТ размещают на поворачивающихся друг относительно друга частях рабочего механизма.

Иногда первичные обмотки ПТ (обмотки возбуждения и квадратурную) располагают на роторе, а вторичные (синусную и косинусную) — на статоре. В этом случае квадратурную обмотку замыкают накоротко, а для подключения обмотки возбуждения используют только два контактных кольца. Такое исполнение ПТ часто применяют при его работе в режиме непрерывного вращения.

Принцип действия ПТ не зависит от места расположения обмоток. В зависимости от выполняемых поворотным трансформатором функций изменяются лишь схемы соединения и питания его обмоток.

§ 33. Принцип действия поворотных трансформаторов

Синусно-косинусный ПТ. Принцип действия ПТ основан на том, что взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора с высокой степенью точности изменяется по синусоидальному (косинусоидальному) закону от угла поворота ротора. Схема

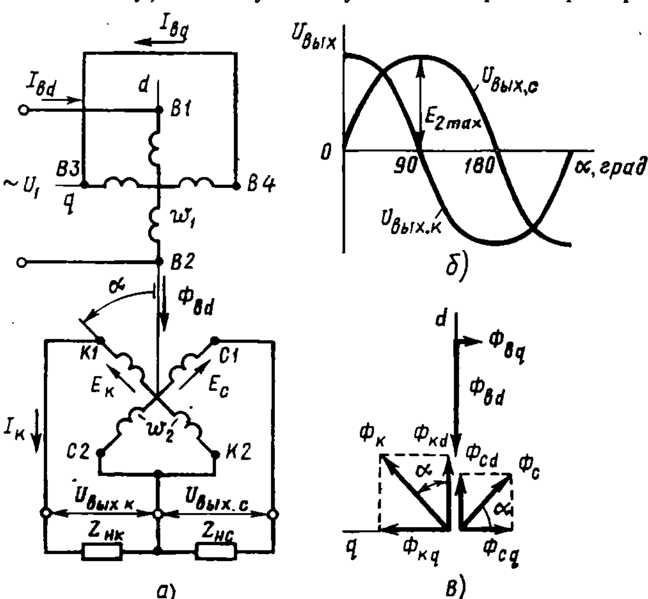


Рис. 87. Схема включения синусно-косинусного ПТ (*а*), его выходные характеристики (*б*) и диаграмма магнитных потоков (*в*)

включения синусно-косинусного ПТ показана на рис. 87, *а*.

Рассмотрим сначала холостой ход ПТ. При подключении обмотки возбуждения с эффективным числом витков w_1 к сети переменного тока в ПТ возникает мдс $F_{вd}=I_{вd}w_1$ и образуется продольный магнитный поток $\Phi_{вd}$, пульсирующий во времени с частотой сети f_1. Этот поток наводит в обмотке возбуждения эдс самоиндукции $E_{вd}$, а в обмотках ротора эдс взаимоиндукции $E_к$ и E_c (эдс в квадратурной обмотке вследствие ее перпендикулярности потоку $\Phi_{вd}$ равна нулю).

Частота наводимых эдс равна частоте сети, а амплитудные или действующие значения эдс $E_к$ и E_c зависят от эффективного числа витков обмоток ротора w_2 и положения вторичных обмоток относительно обмотки возбуждения, т. е. от угла поворота ротора α. При $\alpha=0$ оси обмоток возбуждения и косинусной совпадают, поэтому эдс косинусной обмотки имеет наибольшее значение и определяется, как в обычном трансформаторе:

$$E_к=E_{2\max}=E_{вd}w_2/w_1=k_1E_{вd}, \qquad (73)$$

где $k_1=w_2/w_1$ — коэффициент трансформации (эдс синусной обмотки в этом случае равна нулю). При $\alpha=90°$, наоборот, $E_c=E_{2\max}=k_1E_{вd}$, а $E_к=0$. В общем случае в обмотках ротора индуцируются эдс, пропорциональные косинусу и синусу угла поворота относительно обмотки возбуждения:

$$U_{вых.к}=E_к=k_1E_{вd}\cos\alpha; U_{вых.с}=E_c=k_1E_{вd}\sin\alpha. \qquad (74)$$

Зависимость выходного напряжения от угла поворота ротора называют *выходной характеристикой* ПТ. Выходные характеристики синусно-косинусного ПТ показаны на рис. 87, *б*.

При подключении нагрузки $Z_{нк}$ и $Z_{нс}$ к зажимам вторичных обмоток в электрических цепях обмоток ротора появляются токи $I_к$ и I_c, создающие магнитные потоки $\Phi_к$ и Φ_c, которые можно разложить на продольные составляющие $\Phi_{кd}=\Phi_к\cos\alpha$, $\Phi_{cd}=\Phi_c\sin\alpha$, направленные в соответствии с правилом Ленца встречно потоку возбуждения $\Phi_{вd}$, и поперечные $\Phi_{кq}=\Phi_к\sin\alpha$, $\Phi_{cq}=\Phi_c\cos\alpha$, направленные навстречу друг другу (рис. 87, *в*).

Размагничивающее влияние продольных потоков $\Phi_{кd}$ и Φ_{cd} компенсируется, как это имеет место и в обычном трансформаторе, повышением намагничивающего тока в обмотке возбуждения.

Если поперечные потоки $\Phi_{кq}$ и Φ_{cq} взаимно компенсируют друг друга, компенсацию называют *вторичным симметрированием* ПТ. Полная взаимная компенсация поперечных потоков происходит при равенстве нагрузочных сопротивлений в косинусной и синусной обмотках $Z_{нк}=Z_{нс}$.

Если нагрузка вторичных обмоток неодинакова, поперечные потоки компенсируются лишь частично, и в магнитной цепи ПТ появляется результирующий поперечный поток $\Phi_{2q}=\Phi_{кq}-\Phi_{cq}$,

наводящий в роторных обмотках эдс самоиндукции, которая искажает синусоидальную (косинусоидальную) зависимость выходного напряжения от угла поворота α и вызывает значительную погрешность в работе ПТ.

Для устранения искажающего действия эдс самоиндукции применяют первичное симметрирование ПТ, используя с этой целью квадратурную (компенсационную) обмотку статора *В3—В4*, которую обычно замыкают накоротко. В этом случае магнитный поток Φ_{2q}, сцепляясь с компенсационной обмоткой, наводит в ней эдс $E_{вq}$. Поскольку обмотка *В3—В4* замкнута накоротко, в ней проходит ток $I_{вq}$. Магнитодвижущая сила $F_{вq}=I_{вq}w_1$ создает магнитный поток компенсационной обмотки $\Phi_{вq}$, направленный встречно потоку Φ_{2q}. В результате поперечный магнитный поток уменьшится и точность воспроизведения тригонометрических функций возрастет.

Линейный ПТ. При любом включении обмоток ПТ уравнения его выходных напряжений будут содержать функции $\sin\alpha$ и $\cos\alpha$. Однако, перебирая схемы соединения обмоток, можно получить выходную характеристику в некотором ограниченном диапазоне изменения угла α, близкую к линейной. Например, при небольших изменениях угла α считают, что $\sin\alpha\approx\alpha$, и получают требуемую линейную зависимость $U_{вых}=k_2\alpha$ от синусной обмотки. Однако в этом случае необходимая точность линейной аппроксимации (порядка 0,1%) достигается только при изменении угла α в пределах 4,5°, поэтому использовать для линейного ПТ одну синусную обмотку нерационально.

Рассмотрим схему соединения обмоток ПТ (рис. 88, *а*), в которой компенсационная обмотка замкнута накоротко, а обмотка возбуждения соединена последовательно с косинусной обмоткой. Питание от сети переменного тока подано на зажимы *В1*, *К2*. Выходное напряжение снимается с синусной обмотки, к которой присоединено нагрузочное сопротивление $Z_{нс}$.

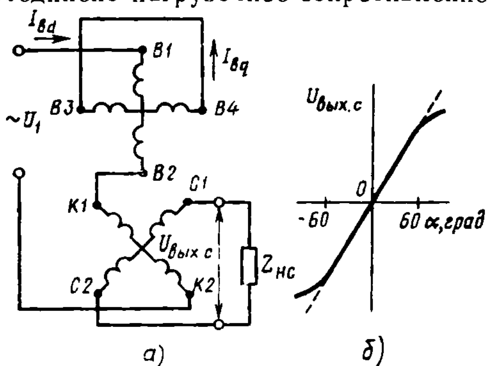


Рис. 88. Схема линейного ПТ (*а*) и его выходная характеристика (*б*)

Поскольку в схеме осуществлено первичное симметрирование (обмотка *В3—В4* замкнута накоротко), можно считать, что поперечный поток в магнитной цепи ПТ отсутствует ($\Phi_{вq}=\Phi_{2q}$) и существует только продольный поток Φ_d. Этот поток индуцирует в обмотках *В1—В2* и *К1—К2* эдс, которые отстают от потока во времени на угол $\pi/2$, т. е. совпадают по фазе и складываются алгебраически, поэтому с учетом формулы (74) можно записать: $E_\Sigma=E_{вd}+E_к=E_{вd}+k_1E_{вd}\cos\alpha=E_{вd}(1+k_1\cos\alpha)$. Принимая во внимание, что $E_c=k_1E_{вd}\sin\alpha$, легко составить отношение $E_c/(k_1\sin\alpha)=E_\Sigma/(1+k_1\cos\alpha)$. Пренебрегая падениями напряжений в обмотках (считая, что $U_{вых.с}=E_c$ и $U_1=E_\Sigma$), найдем выходное напряжение для данной схемы

$$U_{вых.с}=k_1U_1\sin\alpha/(1+k_1\cos\alpha). \quad (75)$$

Если выполнить ПТ с коэффициентом трансформации $k_1=0{,}54$, то в пределах изменения угла ротора $\alpha=\pm60°$ выходное напряжение будет меняться по линейному закону с отклонением, не превышающим 0,01%. Выходная характеристика линейного ПТ, построенная по формуле (75) при $k_1=0{,}54$, показана на рис. 88, *б*. Из рисунка видно, что в диапазоне изменения углов α от —60° до +60° рассмотренная схема ПТ воспроизводит линейную зависимость $U_{вых.с}=k_2\alpha$, где $k_2=k_1U_1$.

ПТ-построитель. Поворотные трансформаторы в режиме построителя используют для определения гипотенузы прямоугольного треугольника по двум заданным катетам, для преобразования прямоугольной системы координат в полярную и т. п.

Схема включения обмоток ПТ-построителя показана на рис. 89, *а*. В схеме обмотки статора присоединены к однофазной сети переменного тока, и с помощью потенциометров *П1*, *П2* на них подают различные напряжения $U_{вd}$ и $U_{вq}$. Одна из обмоток ротора (в данной схеме синусная) присоединена к измерительному прибору — вольтметру *V*, а другая (косинусная) — к обмотке управления *ОУ* асинхронного исполнительного двигателя (ИД). Обмотка возбуждения ИД подключена к однофазной сети через кондесатор С. Синусная обмотка ротора является выходной. Валы ИД и ПТ-построителя механически связаны через редуктор *Р*.

При питании обмоток статора токи, проходящие в них, создают результирующий пульсирующий магнитный поток $\Phi_{рез}$, продольная и поперечная составляющие которого пропорциональны приложенным к обмот-

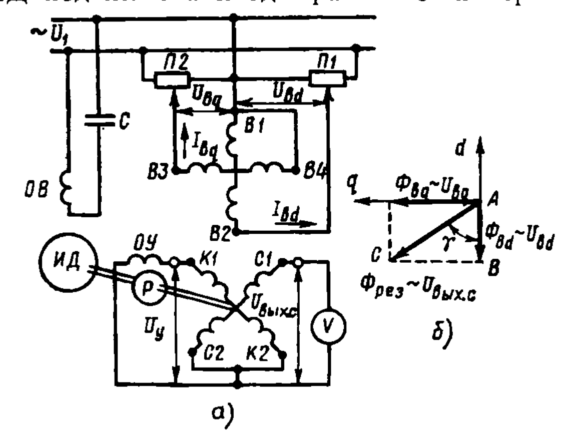


Рис. 89. Схема ПТ-построителя (*а*) и диаграмма его магнитных потоков (*б*)

кам напряжениям: $\Phi_{Bd} \sim U_{Bd}$; $\Phi_{Bq} \sim U_{Bq}$. Поскольку потоки Φ_{Bd} и Φ_{Bq} взаимно перпендикулярны, то результирующий поток определяют как гипотенузу прямоугольного треугольника ABC (рис. 89, *б*): $\Phi_{рез} = \sqrt{\Phi^2_{Bd} + \Phi^2_{Bq}} \sim \sqrt{U^2_{Bd} + U^2_{Bq}}$. В обмотках ротора результирующий поток индуцирует эдс $E_к = k_1\sqrt{U^2_{Bd} + U^2_{Bq}}\cos\gamma$; $E_c = k_1\sqrt{U^2_{Bd} + U^2_{Bq}}\sin\gamma$, где γ — угол между осями косинусной обмотки и результирующего потока.

Электродвижущая сила $E_к$ подается на обмотку управления ИД, который поворачивает ротор ПТ до тех пор, пока сигнал управления ($U_y = E_к$) не станет равным нулю. Таким образом, ротор остановится, когда угол γ будет равен 90°. В этом положении измерительный прибор, присоединенный к синусной обмотке, покажет максимальное напряжение, пропорциональное гипотенузе прямоугольного треугольника, катеты которого пропорциональны напряжениям

$$U_{вых.с} = E_{c\,max} = k_1\sqrt{U^2_{Bd} + U^2_{Bq}}. \tag{76}$$

Выходное напряжение ПТ-построителя можно рассматривать как модуль вектора, заданного в декартовой (прямоугольной) системе координат проекциями U_{Bd} и U_{Bq}. Аргумент вектора определяется углом, на который ротор поворачивается относительно статора. Так, с помощью ПТ-построителя осуществляется переход от прямоугольной системы координат к полярной.

Контрольные вопросы

1. Какую электрическую машину называют поворотным трансформатором?
2. Какие задачи решают с помощью поворотного трансформатора?
3. Каково назначение квадратурной обмотки?
4. Что понимают под вторичным симметрированием?

ГЛАВА VIII. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ. СЕЛЬСИНЫ

§ 34. Общие сведения

В автоматических устройствах часто возникает необходимость в синхронизации вращения или поворота различных механизмов, находящихся на расстоянии друг от друга. Такую задачу обычно решают с помощью электрических машин синхронной связи. В технике получили распространение два основных вида систем синхронной связи: синхронного вращения («электрического вала») и синхронного поворота («передачи угла»).

Систему «электрического вала» применяют для обеспечения синхронного вращения двух или нескольких находящихся на расстоянии друг от друга осей механизмов, имеющих значительные моменты сопротивления. Такую систему чаще всего выполняют с помощью трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором (рис. 90). Обмотки статоров *АД1* и *АД2* получают питание от одной и той же сети трехфазного тока. Роторные обмотки, концы которых выведены на контактные кольца, соединены между собой с помощью щеток проводами (линиями связи *ЛС*).

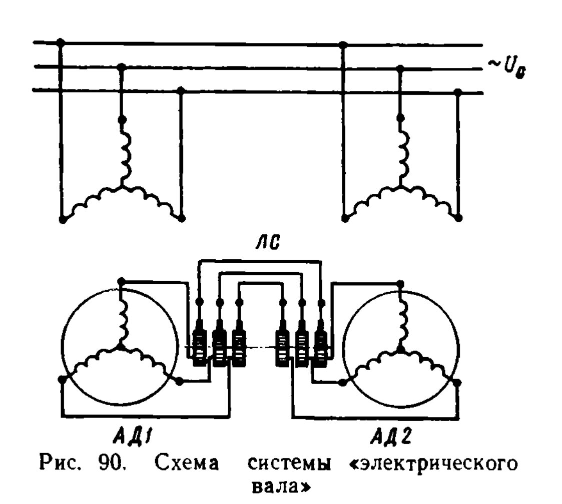


Рис. 90. Схема системы «электрического вала»

Систему «передачи угла» применяют для дистанционного управления, регулирования и контроля положения в пространстве каких-либо устройств. Такую систему выполняют, как правило, с помощью небольших индукционных электрических машин, называемых сельсинами (selfsyn — самосинхронизирующаяся катушка). Простейшая система синхронного поворота содержит два сельсина, соединенных линиями связи. Сельсин, механически соединенный с ведущей осью, называют *датчиком*, а сельсин, соединенный с ведомой осью, — *приемником*.

В схемах автоматики используют два основных режима работы сельсинов: индикаторный и трансформаторный. Индикаторный режим применяют, когда момент сопротивления на ведомой оси мал (ось нагружена стрелкой или шкалой), а трансформаторный — когда на ведомой оси имеется значительный момент сопротивления, т. е. если приходится поворачивать какой-либо механизм.

В зависимости от числа фаз первичной обмотки (обмотки возбуждения) и питающей сети сельсины разделяют на трехфазные и однофазные. В настоящее время в большинстве систем синхронного поворота используют однофазные сельсины.

§ 35. Устройство сельсинов

По конструкции сельсины различают контактные, имеющие скользящие контакты (кольца, щетки), и бесконтактные.

Контактные сельсины изготовляют чаще всего двухполюсными. Магнитопроводы статора и ротора набираются из штампованных листов электротехнической стали и могут быть как явнополюсными (рис. 91, *а*, *б*), так и неявнополюсными (рис. 91, *в*). Явнополюсные сельсины используют для работы в индикаторном, а неявнополюсные — в трансформаторном режиме.

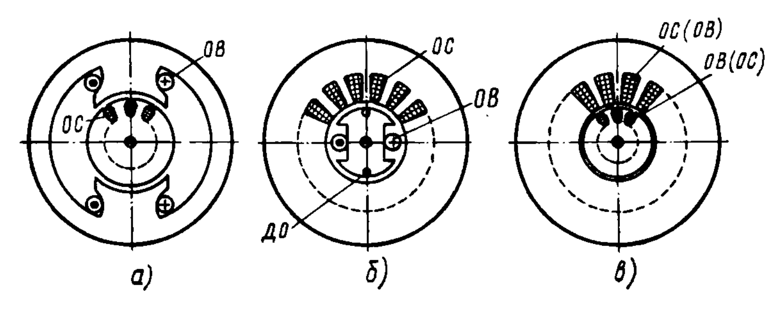


Рис. 91. Схемы магнитной системы однофазного контактного сельсина:

а, б — с явнополюсным статором и ротором, *в* — с неявнополюсным статором и ротором

В явнополюсных сельсинах первичную однофазную обмотку возбуждения *ОВ* выполняют сосредоточенной и размещают на полюсах статора или ротора. В неявнополюсных сельсинах обмотку возбуждения выполняют распределенной и размещают в пазах. Обмотку синхронизации *ОС* всегда выполняют распределенной трехфазной: ее фазы соединяют в звезду. Принцип действия сельсинов не зависит от места расположения каждой из обмоток. Однако чаще всего с целью уменьшения числа контактных колец и повышения надежности работы применяют сельсины, у которых обмотка синхронизации размещена на статоре, а обмотка возбуждения — на роторе. В некоторых типах сельсинов-приемников на явнополюсном роторе устанавливают короткозамкнутую демпферную (успокоительную) обмотку *ДО* (рис. 91, *б*), обеспечивающую быстрое затухание собственных колебаний ротора при переходе из одного положения в другое.

Устройство контактного сельсина СС-405 показано на рис. 92. Сельсин имеет неявнополюсную конструкцию. В пазах его статора

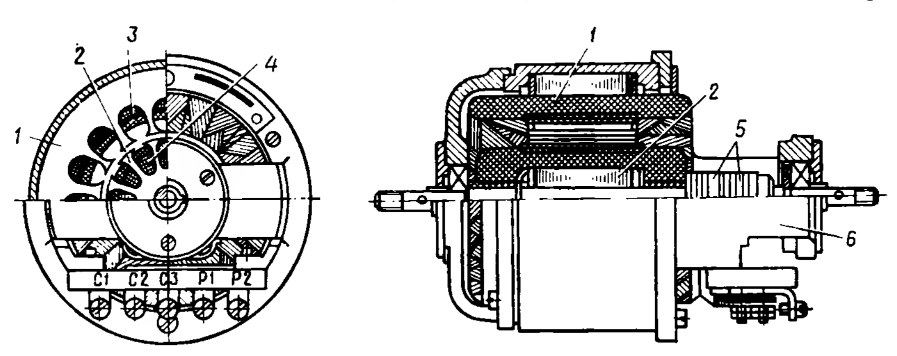


Рис. 92. Устройство контактного сельсина СС-405:

1 — статор, *2* — ротор, *3* — обмотка синхронизации, *4* — обмотка возбуждения, *5* — контактные кольца, *6* — щеткодержатель со щетками

1 и ротора *2* размещены соответственно распределенные трехфазная обмотка синхронизации *3* и однофазная обмотка возбуждения *4*. Концы последней соединены с двумя контактными кольцами *5*, по которым скользят щетки, расположенные в щеткодержателе *6*. Щетки соединены с входными зажимами *Р1*, *Р2* обмотки возбуждения; концы обмотки синхронизации выведены на зажимы *С1*, *С2*, *С3*.

Наличие скользящих контактов (колец и щеток) значительно снижает надежность работы сельсинов, особенно в условиях тряски и вибраций. При слабом нажатии на щетки увеличивается переходное сопротивление контактов щетка — кольцо; при усилении нажатия контакт улучшается, но возрастает момент трения. Для повышения надежности контакта и уменьшения его переходного сопротивления кольца и щетки в сельсинах часто выполняют из сплавов серебра. Однако и в этом случае полностью не удается избавиться от недостатков, связанных с наличием скользящих контактов. Поэтому в настоящее время все чаще применяют бесконтактные сельсины.

Бесконтактные сельсины (рис. 93) выполняют явнополюсными. Статор *5* сельсина практически не отличается от статора обычной синхронной или асинхронной машины. Его сердечник набран из изолированных листов электротехнической стали. В пазах статора расположена соединенная в звезду трехфазная обмотка синхронизации *1*.

Ротор *6* бесконтактного сельсина имеет два полюса, разделенных немагнитным материалом (обычно сплавом алюминия). Полюсы ротора собраны из листов электротехнической стали, размещенных в плоскости, параллельной оси вала.

Однофазная обмотка возбуждения *7* выполнена в виде двух кольцеобразных катушек, расположенных между статором *5* и тороидами *8*. Катушки соединены согласно последовательно и при питании переменным током создают аксиальный магнитный поток.

Тороиды *8* сельсина набраны из листов электротехнической стали кольцевой формы. Для уменьшения потерь от вихревых токов кольца тороидов имеют радиальные прорези. Для получения симметричной магнитной системы применяют веерную шихтовку тороидов, при которой каждое последующее кольцо накладывают на предыдущее с некоторым смещением в тангенциальном направлении.

К наружным цилиндрическим поверхностям тороидов примыкают стержни внешнего магнитопровода *2*, набранные также из листов электротехнической стали и расположенные в аксиальных пазах корпуса. Между стержнями внешнего магнитопровода и сердечником статора имеется воздушный зазор. Корпус *3* и подшипниковые щиты *4* сельсина отлиты из сплава алюминия. Для улучшения динамической устойчивости на валу сельсина-приемника располагают механический дисковый демпфер *9*.

Рис. 93. Устройство бесконтактного сельсина БС-501А:

1, 7 — обмотки синхронизации и возбуждения, *2* — внешний магнитопровод, *3* — корпус, *4* — подшипниковые щиты, *5* — статор, *6* — ротор, *8* — тороиды, *9* — демпфер

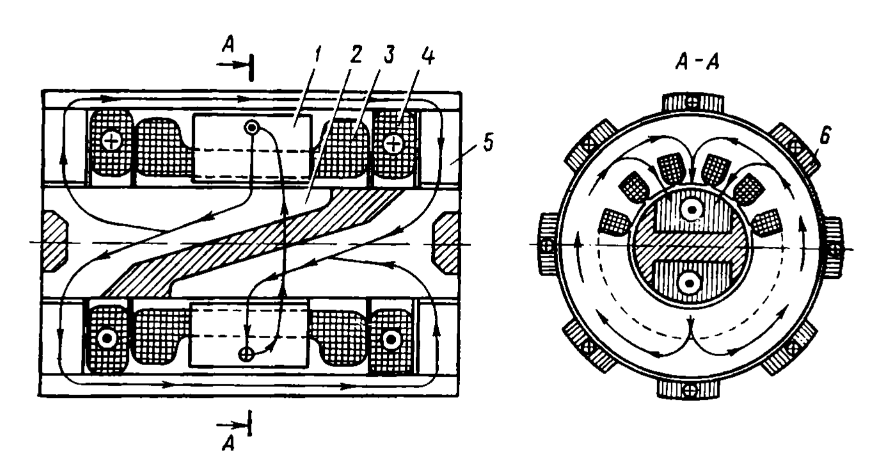


Рис. 94. Схема магнитной цепи бесконтактного сельсина:

1 — статор, *2* — ротор, *3* — обмотка синхронизации, *4* — обмотка возбуждения, *5* — тороиды, *6* — внешний магнитопровод

Проследим путь основного магнитного потока, создаваемого переменным током обмотки возбуждения. Для этого рассмотрим схему магнитной цепи бесконтактного сельсина (рис. 94). Пусть в данный момент времени поток в роторе направлен в соответствии с правилом буравчика справа налево. Чтобы замкнуться вокруг создающих его обмоток возбуждения *4*, потоку необходимо пройти из правого полюса в левый. Однако между полюсами ротора *2* имеется немагнитный косой промежуток, который оказывает потоку большое магнитное сопротивление, поэтому поток устремляется в обход промежутка: он проходит воздушный зазор между правым полюсом ротора *2* и статором *1*, идет по зубцам и спинке статора, пересекает воздушный зазор между статором и левым полюсом ротора.

Попав в левый полюс ротора, поток через воздушный зазор проходит в левый тороид, затем в стержни внешнего магнитопровода, в правый тороид *5* и, пройдя через воздушный зазор между правым тороидом и ротором, замыкается в правом полюсе ротора.

Проходя по статору, магнитный поток обмотки возбуждения сцепляется с обмоткой синхронизации *3*. Таким образом, выполняется условие, необходимое для работы сельсина, — наличие магнитной связи двух неподвижных обмоток. Магнитная связь обмотки возбуждения с той или иной фазой обмотки синхронизации зависит от положения ротора сельсина, не имеющего никаких обмоток.

Отсутствие скользящих контактов значительно увеличивает надежность работы и стабильность характеристик бесконтактных сельсинов по сравнению с контактными. Однако бесконтактные сельсины имеют более сложную конструкцию, повышенную стои-

мость и низкий коэффициент мощности cosα. Последний недостаток обусловлен наличием на пути магнитного потока большого магнитного сопротивления (шесть воздушных зазоров вместо двух в контактных сельсинах).

Несмотря на значительные конструктивные отличия, принцип действия бесконтактных и контактных сельсинов одинаковый.

§ 36. Принцип действия сельсинов в индикаторном режиме

Индикаторный режим работы сельсинов применяют при малом значении момента сопротивления на ведомой оси, обычно когда на ней укреплена уравновешенная стрелка индикатора.

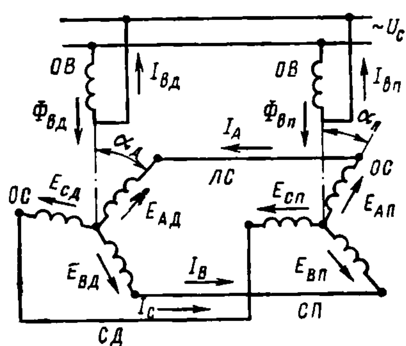


Рис. 95. Схема индикаторной синхронной связи

Простейшая схема синхронной связи для дистанционной передачи угла в индикаторном режиме состоит из двух одинаковых сельсинов (датчика *СД* и приемника *СП*) и линий связи *ЛС* (рис. 95). Однофазные обмотки возбуждения *ОВ* обоих сельсинов подключены к одной и той же однофазной сети переменного тока. Концы фаз трехфазных обмоток синхронизации *ОС* сельсинов приемника и датчика соединены друг с другом линиями связи *ЛС*.

При питании обмоток возбуждения сельсинов переменные токи $I_{вд}$ и $I_{вп}$ создают пульсирующие магнитные потоки $\Phi_{вд}$ и $\Phi_{вп}$, наводящие в обмотках синхронизации эдс. Все эдс в фазах отстают во времени от потоков на угол $\pi/2$, а их значения зависят от пространственного расположения обмотки синхронизации относительно обмотки возбуждения. Такое же явление наблюдается и в поворотных трансформаторах.

При синусоидальном изменении потоков во времени и одинаковых обмоточных данных в фазах обмоток синхронизации сельсинов наводятся эдс:

$$\left.\begin{aligned} &E_{АД} = E_{\text{ф}\max}\cos\alpha_{д}; \quad E_{АП} = E_{\text{ф}\max}\cos\alpha_{п};\\ &E_{ВД} = E_{\text{ф}\max}\cos(\alpha_{д} - 120°); \; E_{ВП} = E_{\text{ф}\max}\cos(\alpha_{п} - 120°);\\ &E_{СД} = E_{\text{ф}\max}\cos(\alpha_{д} + 120); \; E_{СП} = E_{\text{ф}\max}\cos(\alpha_{п} + 120°), \end{aligned}\right\} \quad (77)$$

где $E_{\text{ф}\max}$ — максимальное значение эдс фаз А обмоток синхронизации при $\alpha_д = \alpha_п = 0$ (углы $\alpha_д$, $\alpha_п$ отсчитывают от осей обмоток возбуждения). С помощью этих уравнений можно определить амплитудные или действующие значения эдс, которые во времени изменяются с частотой сети.

Если фазы обмоток синхронизации сельсинов датчика и приемника расположены одинаково относительно соответствующих обмоток возбуждения ($\alpha_д = \alpha_п$), то в одноимеиных фазах *ОС* индуцируются одинаковые и встречно направленные эдс. Эти эдс уравновешивают друг друга, поэтому ток в обмотках синхронизации и линиях связи отсутствует. Такое положение роторов сельсинов называют *согласованным*.

Если какой-либо механизм, расположенный на ведущей оси сельсина-датчика, выведет ротор из согласованного положения, равновесие эдс нарушится. Между одноименными фазами обмоток синхронизации появится разность потенциалов $\Delta E_i = E_{iД} - E_{iП}$ ($i = A, B, C$), при этом в обмотках роторов и линиях связи начнут проходить токи I_A, I_B, I_C. В результате взаимодействия токов обмотки синхронизации с потоком обмотки возбуждения сельсина-приемника возникает вращающий (синхронизирующий) момент $M_с$. Под его действием ротор приемника повернется в ту же сторону и на тот же угол, на который повернулся ротор датчика. Таким образом, сельсины займут новое согласованное положение.

Заметим, что на ротор сельсина-датчика действует такой же, но противоположно направленный синхронизирующий момент, как и на ротор сельсина-приемника. Этот момент воспринимается механизмом, поворачивающим ведущую ось ротора сельсина-датчика. При непрерывном увеличении угла ротор приемника вращается, следуя за ротором датчика.

Синхронизирующий момент, развиваемый сельсином-приемником, зависит от угла рассогласования $\theta = \alpha_Д - \alpha_П$. Для неявнополюсных сельсинов $M_с = M_{с\max}\sin\theta$, где $M_{с\max}$ — максимальный момент при $\theta = 90°$.

В схемах автоматики часто от одного сельсина-датчика работают несколько сельсинов-приемников. В этом случае в качестве датчика используют более мощный сельсин.

Основным требованием, предъявляемым к сельсинам, работающим в индикаторном режиме, является точность передачи задаваемого датчиком угла, зависящая от ряда факторов: удельного синхронизирующего момента (момента, приходящегося на 1° угла рассогласования); момента сопротивления на валу приемника; добротности (отношения удельного синхронизирующего момента к моменту трения приемника); магнитной и электрической несимметрии; механического небаланса ротора; времени успокоения (времени, в течение которого ротор приемника возвращается в согласованное положение после рассогласования на угол ±179°).

Сельсины являются очень точными информационными электрическими микромашинами. В зависимости от допустимой погрешности сельсины-приемники разделяют на четыре класса точности:

Класс точности приемников	I	II	III	IV
Погрешность, град, не более	0,5	0,75	1,0	1,5

§ 37. Принцип действия сельсинов в трансформаторном режиме

Трансформаторный режим работы сельсинов применяют, когда на ведомой оси сельсина-приемника имеется значительный момент сопротивления, при этом сигнал о наличии рассогласования между положениями роторов датчика и приемника подается на исполнительный двигатель, который поворачивает рабочий механизм и ведомую ось ротора приемника, ликвидируя рассогласование.

При работе сельсинов в трансформаторном режиме обмотку возбуждения *ОВ* сельсина-датчика *СД* (рис. 96) подключают к однофазной сети переменного тока, а обмотку возбуждения сельсина-приемника *СП*, являющуюся теперь выходной обмоткой *ВО*,— к усилителю *У*. От усилителя питание подается на обмотку управления *ОУ* исполнительного двигателя *ИД* (на схеме показан асинхронный *ИД* с полым ротором при амплитудно-фазовом управлении). Исполнительный двигатель выполнен с двумя выходными концами вала, один из которых сочленен с рабочим механизмом *РМ*, а другой — с осью ротора приемника, обеспечивая обратную механическую связь *МС*. Обмотки синхронизации обоих сельсинов соединены между собой линиями связи *ЛС*.

Переменный ток $I_{вд}$, проходящий по обмотке возбуждения датчика, создает пульсирующий магнитный поток $\Phi_{вд}$, который индуцирует в трех фазах обмотки синхронизации такие же эдс $E_{Ад}$, $E_{Вд}$, $E_{Сд}$, какие наводились в индикаторном режиме (см. формулы 77). Поскольку обмотки синхронизации приемника и датчика соединены между собой, эти эдс вызывают в них и линиях связи переменные токи I_A, I_B, I_C, которые, постоянно проходя по фазам обмотки синхронизации приемника, создают пульсирующие магнитные потоки $\Phi_{Ап}$, $\Phi_{Вп}$, $\Phi_{Сп}$, пропорциональные мдс фаз и направленные по их осям.

При сложеиии потоки фаз обмотки синхронизации приемника образуют результирующий пульсирующий магнитный поток $\Phi_п$. Максимальное значение потока $\Phi_п$ постоянно, а направление его зависит от угла рассогласования $\theta = \alpha_д - \alpha_п$ (угол θ отсчитывают от поперечной оси ($+q$), угол $\alpha_д$ — от оси обмотки возбуждения датчика и угол $\alpha_п$ — от поперечной оси ($-q$). Если

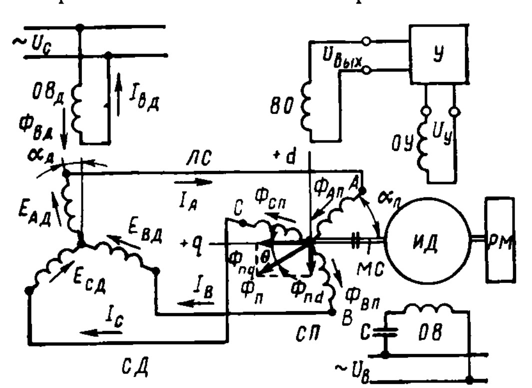


Рис. 96. Схема трансформаторной синхронной связи

затормозить ротор приемника и поворачивать ротор датчика, магнитный поток $\Phi_п$ будет поворачиваться в пространстве, так же как ротор датчика, только в противоположном направлении. Если ротор датчика затормозить и поворачивать ротор приемника, поток $\Phi_п$ будет поворачиваться в пространстве вместе с обмоткой синхронизации приемника в том же направлении.

В общем случае при повороте потока $\Phi_п$ изменяется значение его продольной составляющей $\Phi_{пd}$, сцепленной с выходной обмоткой приемника. Поскольку $\Phi_{пd} = \Phi_п \sin\theta$, то и значение выходной эдс, наводимой этим потоком, будет изменяться от угла рассогласования по синусоидальному закону:

$$U_{вых} \approx E_{вых} = E_{во\,max} \sin\theta, \qquad (78)$$

где $E_{ВО\,max}$ — максимальная эдс выходной обмотки приемника при $\theta = 90°$ и $\Phi_{пd} = \Phi_п$.

Из формулы видно, что выходное напряжение сельсина-приемника изменяется по тому же закону, что и выходное напряжение синусного поворотного трансформатора (74), поэтому рассматриваемый режим работы сельсинов назван трансформаторным.

В трансформаторном режиме сельсин-приемник самостоятельно не отрабатывает задаваемый датчиком угол $\alpha_д$, а лишь вырабатывает эдс $E_{вых}$. Отработка задаваемого угла (поворот рабочего механизма и ротора приемника на угол $\alpha_п = \alpha_д$) осуществляется *ИД*.

При наличии угла рассогласования выходное напряжение сельсина-приемника усиливается и поступает на обмотку управления *ИД*. Ротор двигателя начинает вращаться и поворачивает ротор приемника. Вместе с ротором приемника поворачивается в пространстве и магнитный поток $\Phi_п$, при этом изменяется продольная составляющая потока $\Phi_{пd}$ и эдс $E_{вых} \sim \Phi_{пd}$. Роторы двигателя и сельсина-приемника вращаются до тех пор, пока выходное напряжение приемника не станет равным нулю (пока поток $\Phi_п$ не станет перпендикулярен оси выходной обмотки).

Положение сельсинов в трансформаторном режиме, при котором выходное напряжение приемника равно нулю, называется *согласованным*. Это положение отличается от согласованного положения сельсинов в индикаторном режиме поворотом ротора приемника на угол 90°. Поэтому за начало отсчета углов $\alpha_п$ и принимают ось $-q$, перпендикулярную оси выходной обмотки. В этом случае нулевому углу рассогласования ($\theta = 0$; $\alpha_д = \alpha_п$) соответствует нулевой выходной сигнал ($U_{вых} = 0$).

В действительности в согласованном положении сельсинов на выходной обмотке приемника всегда есть небольшое напряжение, называемое *остаточным* ($U_{ост} = 0{,}1 \div 0{,}3$ В). Наличие остаточного напряжения обусловлено магнитной и электрической несимметрией сельсинов из-за технологических погрешностей. Остаточное напряжение — один из основных факторов, влияющих на точность работы сельсинов в трансформаторном режиме. Другими основ-

ными факторами являются: удельное выходное напряжение (напряжение при угле рассогласования на 1°); удельная выходная мощность (мощность, которую может отдать выходная обмотка приемника при угле рассогласования на 1°); электрическое сопротивление линий связи; количество приемников, работающих от одного датчика.

Сельсины-приемники, предназначенные для работы в трансформаторном режиме, разделяют на те же классы точности, что и сельсины-приемники, работающие в индикаторном режиме. В СССР сельсины выпускают на частоты 50, 400 и 500 Гц.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение сельсинов?
2. В каких режимах работают сельсины?
3. Назовите достоинства и недостатки бесконтактного сельсина.
4. Что понимают под согласованным положением сельсинов в индикаторном и трансформаторном режимах?

ГЛАВА IX. ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОМАШИН

§ 38. Общие сведения

В создании электрических микромашин с высокими энергетическими и другими выходными показателями, надежных при минимальных затратах материалов, большое значение имеют экспериментальные исследования и испытания. При проведении испытаний отдельных типов серийных микромашин проверяют соответствие их показателей требованиям ГОСТов. При испытаниях новых разработок проверяют правильность принятых конструкторско-технологических решений.

Испытания машин малой мощности характеризуются рядом особенностей. В частности, при испытаниях микромашин измеряют малые величины. При этом измерительные устройства и приборы могут потреблять мощности, сравнимые с измеряемыми, и вызывать значительные погрешности. Поэтому при измерении электрических величин (токов, напряжений, потребляемых мощностей) необходимо применять специальные приборы и учитывать их собственное потребление. При измерении неэлектрических величин (вращающих моментов, частот вращения) следует использовать устройства, не вносящие дополнительной нагрузки на вал испытываемого объекта.

Существенное влияние на рабочие характеристики и выходные показатели микромашин оказывает нагревание обмоток, поэтому испытания проводят по возможности при одной и той же температуре, контролируя ее.

Многообразие конструктивных исполнений микромашин, их характеристик и диапазона изменения измеряемых величин не позволяет привести здесь все существующие способы измерения электрических и неэлектрических величин. Рассмотрим основные наиболее типичные способы измерений, широко применяемые на практике.

§ 39. Измерение электрических величин

Измерение тока, напряжения, мощности. При испытании электрических микромашин переменного тока возможно несколько вариантов схем включения амперметра, вольтметра и ваттметра. Предпочтительной из них является схема, показанная на рис. 97. Пределы измерения приборов выбирают исходя из номинальных данных испытываемой машины так, чтобы стрелки приборов находились в правой половине шкалы.

При измерении тока до 1А рекомендуется пользоваться выпрямительными приборами, имеющими малое собственное потребление мощности. Кроме того, эти приборы многопредельные (например, 100—250—1000 мА) и, следовательно, позволяют исследовать различные режимы работы машины. Для измерения токов свыше 1А можно пользоваться электромагнитными и электродинамическими амперметрами с пределами 2,5—5,0 и 5—10 А.

Напряжение рекомендуется измерять вольтметрами, у которых сопротивление не меньше 500—1000 Ом/В (например, электронными и выпрямительными). Выпрямительные вольтметры обладают большей точностью, а электронные имеют меньшее собственное потребление. Собственное потребление вольтметра можно измерить в схеме, показанной на рис. 97, ваттметром при отключении испытываемого объекта.

При измерении мощности выбирают приборы с малым собственным потреблением и небольшой фазной погрешностью. При номинальных токах свыше 0,5 А используют электродинамические ваттметры, при токах, меньших 0,5 А, — электронные ваттметры.

При испытаниях микродвигателей всегда оценивают погрешность при измерении мощности и в случае необходимости вводят поправку на собственное потребление приборов $P_{пр}=I^2_1(R_A+R_W)$, где I_1 — действующее значение потребляемого двигателем тока; R_A и R_W — сопротивления амперметра и токовой цепи ваттметра.

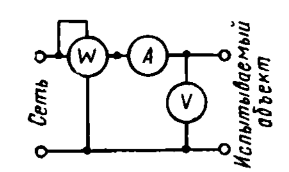


Рис. 97. Схема для одновременного измерения тока, напряжения, мощности

Для измерения мощности машин переменного тока в несколько ватт можно использовать электронный осциллограф *ЭО* (рис. 98). На одну пару пластин осциллографа подают напряжение U_1, пропорцио-

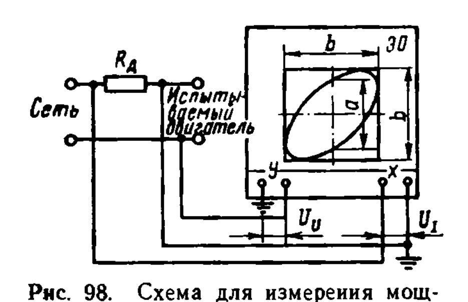


Рис. 98. Схема для измерения мощности с помощью электронного осциллографа

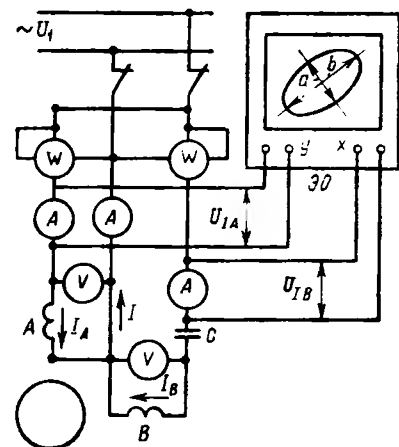


Рис. 99. Схема для испытания конденсаторного двигателя

нальное току цепи, в которой измеряют мощность. Это напряжение снимают с небольшого добавочного резистора $R_Д$. На другую пару пластин подают напряжение U_U этой цепи. Усиления сигнала по осям x и y подбирают так, чтобы отклонения по ним были одинаковыми. При синусоидальных напряжениях на экране осциллографа появляется фигура Лиссажу, имеющая вид эллипса. Тогда, измеряя отрезки a и b, можно определить угол $\varphi_1=\arcsin b/a$ и потребляемую мощность $P_1=U_1I_1\cos\varphi_1$, где U_1 и I_1 измеряют вольтметром и амперметром.

Оценка формы магнитного поля. Электронный осциллограф может быть использован для оценки характера магнитного поля в однофазных машинах переменного тока с фазосмещающими элементами. Для этого подают на вертикальные y и горизонтальные x входы осциллографа токи фаз или, например, пропорциональные им напряжения с соответствующих амперметров U_{IA} и U_{IB} (рис. 99).

Как известно, круговое поле в машине с двумя сдвинутыми в пространстве на электрический угол 90° обмотками статора образуется при условии равенства мдс обмоток $I_A w_{Aэф}=I_B w_{Bэф}$, т. е. при $I_A=k_1 I_B$ (где $k_1=w_{Bэф}/w_{Aэф}$ — коэффициент трансформации) и сдвиге токов во времени на угол $\pi/2$. Таким образом, усиление по обеим осям осциллографа должно отличаться в k_1 раз. Необходимое усиление устанавливают ручкой регулировки чувствительности «Усиление» при подаче на пластины осциллографа контрольного сигнала переменного тока.

Если в машине образуется круговое поле, отклонения по осям x и y будут одинаковыми и на экране осциллографа появится окружность. Если условия образования кругового поля не соблюдают, на экране осциллографа появится эллипс. О степени эллиптичности магнитного поля судят по соотношению его осей. Коэффициент эллиптичности поля $k_\varepsilon=b/a$ (b и a — соответственно большая и малая оси эллипса). При круговом поле $k_\varepsilon=1$, при эллиптическом $k_\varepsilon>1$.

Измерение активного сопротивления. Активное сопротивление обмоток можно измерять с помощью моста постоянного тока или вольтметра и амперметра при постоянном токе.

Если сопротивление вольтметра, включаемого непосредственно на испытываемую обмотку, отличается от ее сопротивления $R_{изм}$ менее чем в 100 раз, вводят поправку: $R_{изм}=U_1/(I_1-U_1/R_V)$, где U_1, I_1 — измеренные напряжение и ток; R_V — сопротивление вольтметра.

Измеряя активное сопротивление, можно определить превышение температуры обмотки машины над температурой окружающей среды. Для этого перед включением машины на напряжение измеряют сопротивление обмотки в холодном состоянии $R_х$ и температуру окружающей среды $\vartheta_{о.с}$. Затем машину включают на номинальное напряжение и выдерживают в этом режиме до достижения установившегося теплового режима, о чем свидетельствует постоянство сопротивления обмотки. При установившемся тепловом режиме измеряют сопротивление обмотки в горячем состоянии $R_г$ и определяют превышение температуры обмотки, °С: $\theta=(c_\theta+\vartheta_{о.с})(R_г-R_х)/R_х$, где c_θ — коэффициент, равный 235 или 245 для обмоток из медных и алюминиевых проводов соответственно.

Нагревание и охлаждение микромашин происходят значительно быстрее, чем машин средней мощности, поэтому, если сопротивление измеряют при отключении машины от сети, процесс осуществляют очень быстро (от 3 до 5 с).

§ 40. Измерение врващающих моментов

Рабочие и пусковые характеристики электрических микромашин снимают, как правило, методом непосредственного нагружения машин с одновременным измерением развиваемого момента и частоты вращения. Для определения пусковых, максимальных и минимальных моментов применяют нагрузочно-измерительные устройства, называемые *тормозами-моментомерами*.

Тормоза-моментомеры должны иметь небольшие погрешности при различных частотах вращения, обладать малой инерционностью, обеспечивать стабильность нагрузочного момента при изменении температуры окружающей среды.

В основе методов измерения вращающих моментов лежит уравнение движения ротора: $M=M_в+M_{дин}$, где M — вращающий момент электрической машины; $M_в$ — внешний момент сопротивления (нагрузки) приводимого во вращение механизма; $M_{дин}$ — динамический момент, пропорциональный изменению энергии вращающихся масс.

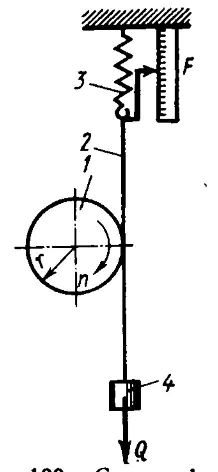


Рис. 100. Схема фрикционного тормоза-моментомера:

1 — шкив, *2* — лента, *3* — динамометр, *4* — груз

В установившемся режиме (при постоянной частоте вращения) $M_{дин}=0$ и $M=M_в$, отсюда следует, что для определения вращающего момента машины достаточно измерить момент сопротивления на валу, создаваемый нагрузочным устройством.

Фрикционные тормоза-моментомеры. Фрикционные тормоза наиболее просты в конструктивном отношении. Тормозной момент в них создается вследствие сил трения при взаимном перемещении трущихся элементов. Схема фрикционного тормоза показана на рис. 100. На валу испытываемой машины расположен шкив *1* с радиусом *r*, прижатый к ленте (нити) *2*, которая прикреплена к динамометру *3*. Натяжение ленты обеспечивается грузом *4*. Вращающий момент машины, равный моменту сопротивления $M=(F-Q)\,r$, где F — показание динамометра, Н; Q — сила тяжести груза, Н; r — радиус шкива, м.

Устройство фрикционного тормоза-моментомера маятникового типа, обеспечивающего бо́льшую точность измерений, чем рассмотренный выше тормоз, показано на рис. 101. Изменение нагрузки испытываемого двигателя *8* осуществляется натяжением шнура *7*, охватывающего шкивы *6* (тормоза) и *9* (двигателя). Маятник *1* жестко связан со шкивом тормоза и стрелкой *5* и уравновешивает силу трения между шкивом двигателя и шнуром. Пределы измерения устанавливают изменением массы и положения груза маятника. Натяжение шнура осуществляют гайкой *2*, передвигающей в горизонтальном направлении подвижную раму *3*.

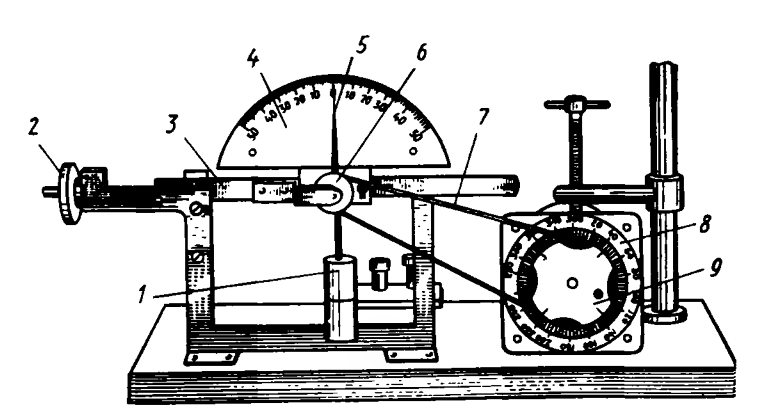


Рис. 101. Маятниковый фрикционный тормоз-моментомер:

1 — маятник, *2* — гайка, *3* — подвижная рама, *4* — шкала, *5* — стрелка, *6*, *9* — шкивы тормоза и двигателя, *7* — натяжной шнур, *8* — испытываемый двигатель

Градуировку шкалы *4* выполняют так: на шкив тормоза известного радиуса $r_т$ подвешивают с помощью нити контрольный груз силой тяжести $Q_к$ и определяют цену деления моментомера:

$$c_м = Q_к r_т / n_к, \quad (79)$$

где $n_к$ — число делений на шкале, указанное стрелкой при градуировке. Вращающий момент испытываемого двигателя $M=c_м n_{изм}$, где $n_{изм}$ — число делений, указанное стрелкой при испытании двигателя.

Фрикционные тормоза-моментомеры применяют при испытаниях машин полезной мощностью не более 10 Вт и частотой вращения, не превышающей 3000 об/мин. Сравнительно узкая область применения фрикционных нагрузочных устройств обусловлена их недостатками, основными из которых являются: малый срок службы вследствие износа трущихся элементов, затрудненный отвод теплоты и значительная зависимость коэффициента трения от температуры трущихся тел. В настоящее время фрикционные тормоза-моментомеры вытесняются электромагнитными тормозными устройствами.

Электромагнитные тормоза-моментомеры. В электромагнитных тормозах нагрузочный момент создается в результате взаимодействия магнитного поля с наведенными им вихревыми токами в электропроводящем роторе. Магнитное поле может быть создано постоянными магнитами или обмоткой возбуждения, питаемой постоянным или переменным током. Ротор бывает дисковым или цилиндрическим, выполненным из сплава алюминия или меди,

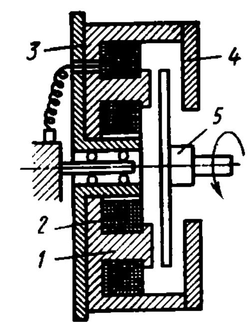


Рис. 102. Схема электромагнитного тормоза:

1 — магнитопровод, *2* — катушка возбуждения, *3* — несущее кольцо, *4* — полюсные наконечники, *5* — диск

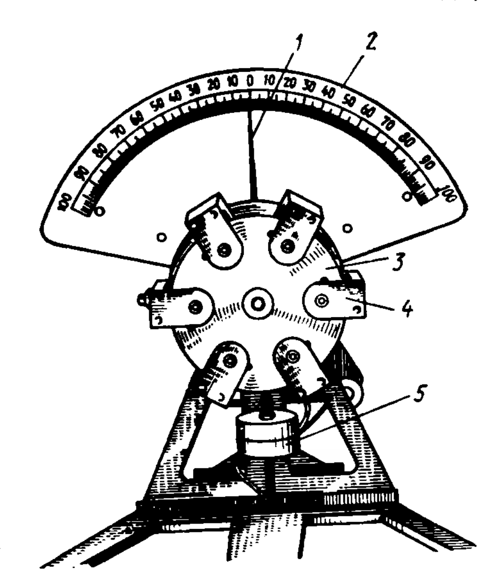


Рис. 103. Электромагнитный тормоз серии ТЭМ:

1 — стрелка, *2* — шкала, *3* — диск, *4* — система электромагнитов, *5* — груз

поэтому существует большое разнообразие конструктивных схем электромагнитных тормозов.

Наиболее распространены дисковые электромагнитные тормоза (рис. 102). Тормоз содержит систему электромагнитов, состоящую из стального магнитопровода *1*, катушек возбуждения *2*, питаемых постоянным током, и полюсных наконечников *4*. Электромагниты укреплены на несущем кольце *3*, которое может поворачиваться относительно оси вала тормоза. В магнитном поле электромагнитов размещен алюминиевый (медный) диск *5*, соединенный с валом испытываемого двигателя.

При вращении диска в магнитном поле в нем возникают вихревые токи. В результате взаимодействия этих токов с магнитным полем образуется электромагнитный момент, тормозящий диск и, следовательно, вал испытываемого двигателя. Такой же момент, но противоположного знака действует на электромагниты, которые начнут вращаться, если не создать уравновешивающего момента. В электромагнитном тормозе этот момент создается с помощью груза *5* (рис. 103), связанного с помощью штока с несущим кольцом. Таким образом устанавливается равенство абсолютных значений моментов: $M = M_{\text{т.д}} = M_{\text{эм}} = M_Q$, где M — вращающий момент двигателя; $M_{\text{т.д}}$ — момент, тормозящий диск; $M_{\text{эм}}$ — момент, действующий на электромагниты; M_Q — уравновешивающий момент груза.

Градуировку электромагнитного тормоза выполняют так же, как фрикционного, только в формулу (79) вместо радиуса шкива тормоза подставляют радиус несущего кольца.

Электромагнитный тормоз легко регулируется. Для регулирования нагрузочного момента достаточно изменить с помощью реостата ток в обмотке возбуждения. Начальный пусковой момент испытываемого двигателя определяют при обесточенной обмотке возбуждения установкой стопорной шпильки в отверстие диска.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает электромагнитные тормоза серии ТЭМ, которая включает типы ТЭМ-400, ТЭМ-300, ТЭМ-200, ТЭМ-100 (число в наименовании указывает диаметр диска в миллиметрах).

§ 41. Измерение частоты вращения

Тахогенераторы. Один из способов измерения частоты вращения с помощью информационных электрических машин — тахогенераторов, выходное напряжение которых пропорционально частоте вращения ротора, был рассмотрен в гл. VI.

При измерении частоты вращения тахогенератор жестко соединяют с испытываемым двигателем. Выходное напряжение тахогенератора подают на регистрирующие приборы — вольтметры, самописцы, осциллографы и т. п. Точность измерения частоты вращения тахогенераторами относительно невелика, так как они создают дополнительный момент сопротивления и момент инерции на валу испытываемого двигателя.

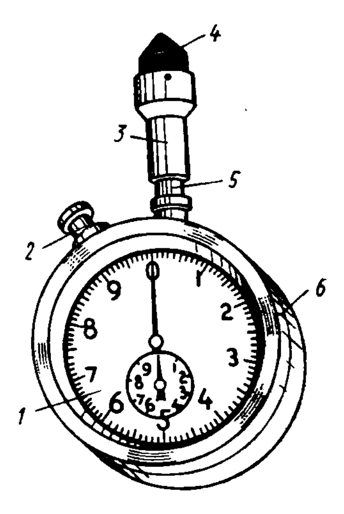


Рис. 104. Часовой тахометр:
1 — циферблат, *2* — переключатель диапазонов, *3* — насадка, *4* — прижимная головка, *5* — вал, *6* — корпус

Часовой тахометр. Часовой тахометр (рис. 104) состоит из насадки *3* с прижимной головкой *4*, расположенных на ведомом валу *5*, кинематической передачи, размещенной в корпусе *6* тахометра, циферблата *1* и переключателя диапазонов частоты вращения *2*.

Часовые тахометры широко применяют для измерения частот вращения силовых двигателей мощностью свыше 100 Вт, работающих в установившихся режимах. В двигателях меньшей мощности использование часового тахометра может привести к значительным погрешностям из-за увеличения момента сопротивления при нажатии головкой на торец выходного вала испытываемого двигателя.

Строботахометры. Если требуется измерить частоту вращения испытываемой машины, не внося дополнительного момента сопротивления, применяют строботахометр (рис. 105), состоящий из осветителя и блока управления. Импульсная лампа *1* осветителя с рефлектором *2* закреплена на специальной стойке, внутри которой размещен импульсный трансформатор. С помощью кабеля трансформатор подключен к блоку управления *4*, в котором смон-

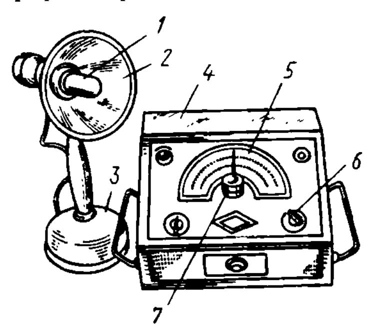


Рис. 105. Строботахометр:
1 — импульсная лампа, *2* — рефлектор, *3* — корпус трансформатора, *4* — блок управления, *5* — измерительная шкала, *6* — переключатель диапазонов, *7* — ручка регулятора импульсов

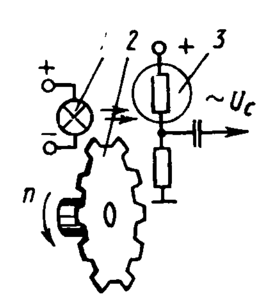


Рис. 106. Схема фототахометра

тирован задающий генератор импульсов с измерительной шкалой импульсов *5*, имеющей три диапазона частоты вращения: 300—1200, 1200—6000, 6000—30000 об/мин. Переход с одного диапазона на другой осуществляется переключателем *6*, а плавное регулирование частоты импульсов задающего генератора — ручкой *7*, связанной со стрелкой прибора.

При измерении частоты вращения освещают лампой вал испытываемого двигателя и регулируют частоту ее вспышек до тех пор, пока вал (метка на валу) не станет казаться неподвижным. При кажущейся остановке вала его частота вращения равна частоте импульсов, измеряемой по шкале прибора.

Вал будет казаться неподвижным и при частоте импульсов, меньшей в целое число раз истинной частоты вращения, поэтому следует изменять частоту импульсов от большего значения к меньшему. При этом истинной частоте вращения вала будет соответствовать первая частота импульсов, при которой вал «остановится».

Фототахометр. Основными элементами фототахометра являются световой источник *1*, модулятор светового потока *2* и фотодатчик *3* (рис. 106). Модулятор фототахометра представляет собой диск с прорезями (отверстиями) и располагается на валу испытываемого двигателя. С одной стороны модулятора напротив прорезей размещают источник светового потока, с другой — фотодатчик.

При вращении вала с модулятором фотодатчик освещается переменным световым потоком, частота которого пропорциональна частоте вращения ротора двигателя. С той же частотой светового потока фотодатчик либо изменяет свое сопротивление (фоторезистор), либо разрывает или замыкает электрическую цепь (фотодиод). Таким образом, фотодатчик преобразует переменный световой сигнал в переменный электрический сигнал, содержащий информацию о частоте вращения вала. Электрический сигнал может подаваться на стрелочный или цифровой измерительный прибор, отградуированный в оборотах в минуту.

Выбор измерительного прибора, нагрузочного устройства и тахометра зависит от технических данных испытываемой микромашины, ее назначения и требуемой точности измерений.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляют к измерительным приборам, используемым при испытании микромашин?
2. Как определяют форму магнитного поля в двухфазной электрической машине?
3. Какие способы измерения вращающих моментов электродвигателей вы знаете?
4. Назовите способы измерения частоты вращения ротора электрической машины.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ
ПРОИЗВОДСТВО МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

ГЛАВА X. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

§ 42. Определения и основные понятия

Слово «технология» образовано из двух греческих слов «техно» — мастерство и «логос» — учение. Как отрасль науки технология занимается изучением связей и закономерностей процессов изготовления машин. Объектом исследования технологии является процесс изготовления машин, а целью — раскрытие связи и закономерностей, действующих в этом процессе.

Производственный процесс — это совокупность производственной деятельности всего персонала предприятия и эксплуатации технологического, энергетического и прочего оборудования, в результате чего сырье и материалы превращаются в продукцию предприятия. Составной частью производственного процесса, кроме процессов труда, непосредственно связанных с изготовлением продукции, является также любая производственная деятельность на предприятии, например проектно-конструкторская, технологическая, управленческая, юридическая, снабженческая и т. д.

Технологический процесс — часть производственного процесса, непосредственно связанная с последовательным изменением состояния предмета производства (изменение формы, размеров, свойств материалов) в соответствии с требованиями технической и технологической документации для получения детали или машины, отвечающей заданным техническим требованиям. Действия по установке и снятию заготовок со станков при их обработке, хотя и не изменяют состояния заготовок, но настолько связаны с технологическим процессом, что не могут быть отделены от него. Технологический процесс разбивают на технологические операции.

Технологическая операция — законченная часть технологического процесса, выполняемого на одном рабочем месте и включающего действия рабочего и работу станка при обработке детали или сборке изделия. Операция может выполняться одним рабочим или группой рабочих и охватывает все действия до перехода к обработке следующего изделия. Операция — основная часть технологического процесса; по ней определяют трудоемкость изготовления

изделий, необходимое количество рабочих, станков, инструмента, приспособлений и т. п. Технологические операции разделяют на части.

Установ — часть технологической операции, выполняемая при одном базировании и креплении изделия (например, крепление вала в токарном станке для его обработки).

Технологический переход — однородная часть технологической операции, в результате которой происходит только одно технологическое изменение детали. Этот переход характеризуется неизменностью обрабатываемой поверхности, инструмента и режима обработки (например, токарная обработка детали за несколько рабочих ходов).

Рабочий ход — часть технологического перехода, ограниченная снятием одного слоя обрабатываемого материала за однократное перемещение инструмента (рабочий ход может совпадать с переходом).

Вспомогательный переход — самостоятельная часть технологической операции (состоящая из работы оборудования и действий рабочего), не сопровождаемая изменением объекта труда, но необходимая для выполнения рабочего хода (например, смена или холостое перемещение инструмента, установка и закрепление заготовки).

Технологический процесс осуществляется на рабочих местах, которые представляют собой участок производственной площади, оборудованный в соответствии с выполняемой работой. Для осуществления определенной части технологического процесса используют технологическое оборудование (литейные машины, прессы, станки, печи, ванны, испытательные стенды), на котором размещают заготовки и средства воздействия на них. К оборудованию добавляют технологическую оснастку (режущий инструмент, штампы, приспособления, калибры, пресс-формы, литейные формы) для выполнения определенной части технологического процесса.

§ 43. Технологическая последовательность операций при изготовлении электрических машин

Электрические машины выпускают обычно сериями, каждая из которых имеет определенную область применения и состоит из ряда машин с общими конструктивно-технологическими свойствами. В серии машины имеют различные исполнения и модификации. Для обеспечения необходимого производства заводы специализированы на изготовление определенного типа или группы машин, сходных по конструкции.

При производстве электрических машин используют все технологические процессы общего машиностроения (черное и цветное литье, ковку, штамповку, прессование пластмасс и металлопорошков, все виды механической обработки, сварку, термообработку, гальванопокрытия, окраску), а также присущие только электротехническим изделиям (холодную листовую штамповку электротехнической стали, сборку сердечников, намотку катушек, укладку и пропитку обмоток, сборку коллекторов).

Существует группа материалов, используемых в основном в электротехническом производстве: листовая электротехническая сталь, обмоточные провода, пропиточные лаки и компаунды, покровные эмали и электрическая изоляция (электротехнический картон, стеклоткани, лавсановые пленки и ленты, миканиты, слюдинитовая и слюдопластовая бумаги, различные композиционные материалы).

Специальные технологические процессы и материалы определяют состав специального технологического оборудования, к которому относят: листоштамповочные автоматы; установки для сборки и скрепления сердечников магнитопроводов; полуавтоматические и автоматические станки для изготовления обмотки, ее укладки, пропитки, бандажирования, а также для изготовления коллекторов и т. п.

Изготовление электрических машин, как и всякого другого изделия, состоит из операций получения заготовок, их обработки и сборки машины. Рассмотрим более подробно последовательность операций на примере изготовления асинхронного электродвигателя с высотой оси вращения 56 мм (см. рис. 9). Схема последовательности операций показана на рис. 107. Заготовку вала *1* (см. рис. 9, *б*) получают, отрезая круглый прокат и механически обрабатывая его. Листы статора и ротора штампуют на автоматических прессах. Листы ротора собирают на оправку, прессуют и в пазы заливают алюминиевую обмотку. Затем в сердечник *6* ротора запрессовывают вал *1*, производят механическую обработку наружной поверхности сердечника и шеек вала под посадку подшипников *12*, и готовый ротор отправляют на сборку машины.

Листы статора собирают в сердечник *4*, прессуют и скрепляют сваркой. Наружную поверхность сердечника обрабатывают под посадку в корпус *13*, а в пазы укладывают обмотку *3*, которую пропитывают лаком и сушат. Корпус *13* и подшипниковые щиты *9* отливают из алюминия и механически обрабатывают. Вентилятор *10*, его кожух *14* и колодку выводов отливают из пластмассы.

Сборку двигателя начинают запрессованием в корпус *13* сердечника с обмоткой *4*, производят механическую обработку мест для установки подшипниковых щитов, фрезеруют поверхности лап и сверлят в них отверстия. Затем собирают коробку выводов, напрессовывают на ротор подшипники, устанавливают ротор в статор, надевают щиты и напрессовывают их на посадочные места в корпусе, устанавливают шпильки и завертывают на них гайки. Надевают на вал вентилятор *10*, его кожух *14* и крепят пос-

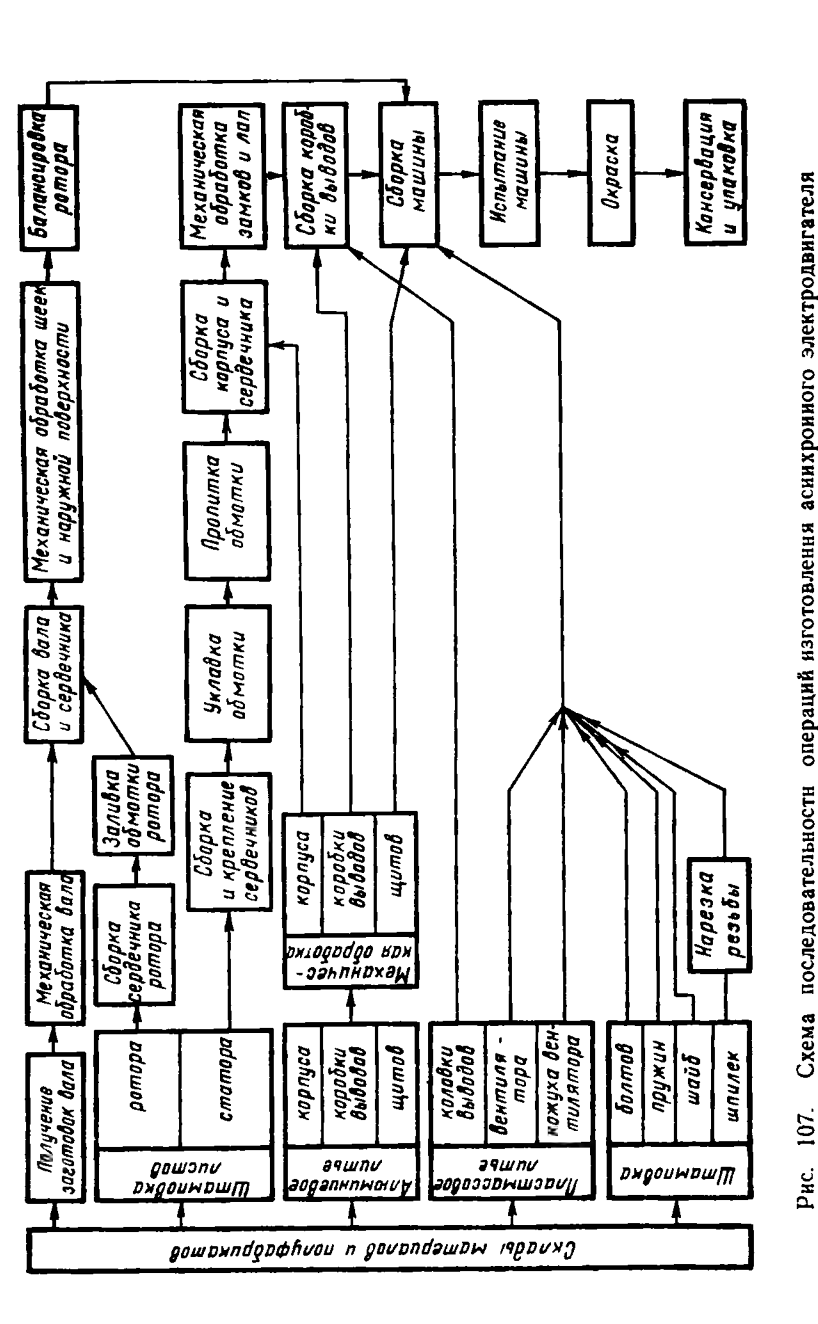


Рис. 107. Схема последовательности операций изготовления асинхронного электродвигателя

ледний. Собранный двигатель испытывают, окрашивают, упаковывают и отправляют на склад готовой продукции.

§ 44. Типы производств и методы работы

В машиностроении различают три типа производств (массовое, серийное и единичное) и два метода работы (поточный и непоточный).

Массовое производство характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготовляемых в течение продолжительного времени. Основным признаком массового производства является не только количество выпускаемых изделий, но и выполнение на большинстве рабочих мест одной закрепленной за ними постоянно повторяющейся операции. Программа выпуска в массовом производстве обусловливает возможность узкой специализации рабочих мест и расположения оборудования по ходу технологического процесса в виде поточных линий. Длительность операций на всех рабочих местах одинакова или кратна по времени и соответствует заданной производительности.

Поточная организация производства обеспечивает значительное сокращение технологического цикла, резко снижает трудоемкость и себестоимость изделий, позволяет упростить управление производством.

Серийное производство характеризуется ограниченной номенклатурой изделий, изготовляемых периодически повторяющимися партиями, и большим объемом выпуска.

В крупносерийном производстве широко применяют оборудование специального назначения и агрегатные станки. Оборудование располагают не по типам станков, а по изготовляемым предметам или в соответствии с выполняемым технологическим процессом.

Среднесерийное производство занимает промежуточное положение между крупно- и мелкосерийным. На размер партии в серийном производстве влияют годовой выпуск изделий, длительность процесса обработки и наладки технологического оборудования. В мелкосерийном производстве размер партии обычно составляет несколько единиц, в среднесерийном — несколько десятков, в крупносерийном — несколько сотен деталей.

Мелкосерийное производство по своим технологическим особенностям приближается к единичному.

Единичное производство характеризуется широкой номенклатурой изготовляемых изделий и малым объемом их выпуска. Характерный признак единичного производства — осуществление на рабочих местах различных операций. Продукция единичного производства — машины и аппараты, которые изготовляют по отдель-

ным заказам, предусматривающим выполнеиие специальных требований. К ним также относят опытные образцы.

Единичиое производство электрических машин должио быть уииверсальным и гибким для выполнения различных заданий. При единичиом производстве применяют быстропереналаживаемое оборудование, которое позволяет переходить с изготовления одиой продукции на другую с минимальной потерей времени. К такому оборудованию относят станки с программным управлением, автоматизированные склады, управляемые ЭВМ, гибкие автоматизированные ячейки, участки и т. д.

При широкой номенклатуре и небольших количествах выпускаемых изделий необходимы частые перенастройки оборудоваиия, которые снижают его производительность. Для снижения трудоемкости выпускаемых изделий в последиие годы иа базе автоматизированного оборудования и электроники разрабатывают гибкие автоматизированные производственные системы (ГАПС), позволяющие изготовлять отдельные детали и изделия различного исполнения без переиастройки оборудования. Количество изделий, выпускаемых на ГАПС, задается при ее разработке.

При производстве машин малой мощности применяют все типы производств. Электродвигатели для стиральных машин, холодильников, кофемолок и других изделий бытового назначения, выпускаемые в больших количествах (несколько миллионов штук в год), изготовляют по типу массового производства, микромашины для автоматических устройств со специальными характеристиками, выпускаемые сотнями тысяч штук в год, — по типу серийного и крупносерийного производства, а выпускаемые по нескольку сот штук в год — по тнпу единичного производства.

Из-за большого разнообразия коиструкций машии малой мощности невозможно рассмотреть технологию изготовления каждой машины, поэтому в данном пособии рассматривается техиология их изготовления по видам работ.

§ 45. Технологическая документация

Любое изделие изготовляют в соответствии с конструкторской и технологнческой документацией. К конструкторским относят графические и текстовые документы, которые определяют устройство изделия и содержат необходимые данные для его изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта. Из различных конструкторских документов рабочие чаще всего пользуются чертежом детали и сборочным чертежом.

Чертеж детали содержит ее изображение (рисунок) и другие необходимые данные для изготовления и контроля детали (размеры с допусками, шероховатости всех поверхностей, взаимное положение поверхностей, в некоторых случаях способы обработки). *Сборочный чертеж* содержит изображение сборочной единицы и необходимые данные для ее сборки и контроля (взаимное положение деталей, образование разъемных и иеразъемных соединений).

К технологическим относят графические и текстовые документы, которые определяют технологический процесс изготовлеиия или ремонта изделия (включая контроль и перемещения), комплектацию деталей, сборочных едиииц, материалов, оснастки, маршрут прохождения изготовляемого изделия по службам предприятия и т. п. В комплект технологических входят основные документы: маршрутиая карта, карта технологического процесса и ведомость деталей к типовому технологическому процессу. Основной технологический документ полностью и однозначно определяет технологический процесс изготовления изделия.

Маршрутная карта (МК) содержит описание технологического процесса всех операций в технологической последовательности с указанием оборудоваиия, оснастки, материальных и трудовых нормативов. В карте указываются заготовка, подлежащая обработке, или детали, подлежащие сборке, станки, инструмент и приспособления, разряд рабочего, время, необходимое для обработки одной или нескольких деталей, профессия рабочего и т. п.

Карта технологического процесса (КТП) содержит описание технологического процесса по всем операциям одного вида работ, выполняемых в одном цехе в технологической последовательиости с указанием данных о средствах технологического оснащения, материальных и трудовых нормативах.

Ведомость деталей к типовому технологическому процессу (ВТП) содержит перечень деталей (сборочных единиц), изготовляемых по типовому технологическому процессу с указанием данных о трудовых нормативах, а при необходимости о материалах, технологической оснастке и режимах обработки.

Кроме основных документов в зависимости от типа и характера производства разрабатывают документы общего назначения.

Технологическая инструкция (ТИ) содержнт описание приемов работ или технологических процессов изготовления изделия, правил эксплуатации средств технологического оснащения, описаиие физических и химических явлений, возникающих при отдельных операциях. В этих инструкциях допускается описание процессов изготовления смол, компаундов, клея, заливки смолами и компаундами и т. п.

Ведомость расцеховки (ВР) содержит данные о маршруте прохождения изготовляемого изделия по службам предприятия.

Ведомость оснастки (ВО) содержит перечень технологической оснастки, необходимой для выполнения данного технологического процесса. Записи в ВО производят в технологической последовательности в соответствии с маршрутной картой.

Ведомость материалов (ВМ) содержит данные о заготовках, нормах расхода материала.

Комплектовочная карта (КК) содержит данные о деталях, сборочных единицах и материалах, входящих в комплект изделия. Запись в КК осуществляют в технологической последовательности выполнения операций.

Карта эскизов (КЭ) содержит эскизы, схемы и таблицы, необходимые для выполнения технологического процесса.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение технологического процесса.
2. Что подразумевают под технологической операцией?
3. Какова последовательность технологических операций при изготовлении асинхронного двигателя?
4. Какие типы производств вы знаете?
5. Какие основные документы входят в комплект технологической документации?

ГЛАВА XI. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАГОТОВОК

§ 46. Литье цветных сплавов

При изготовлении машин малой мощности широко применяют литье из алюминиевых, цинковых, медных и других цветных сплавов. Из алюминиевых и цинковых сплавов отливают корпуса, щиты и другие конструкционные детали, производят скрепление отдельных деталей между собой. Из медных сплавов отливают щеткодержатели, втулки и т. п.

Большинство отливок из алюминия производят под давлением. Литье под давлением позволяет получить литую заготовку, близкую по конфигурации и размерам к готовой детали в такой степени, что последующая механическая обработка становится минимальной, либо исключается совсем. Изготовление отливок под давлением основано на запрессовке жидкого металла в металлическую пресс-форму под давлением 30—100 МПа. Точность размеров отливок в зависимости от конструкции пресс-форм допускается в пределах 0,03—0,18 мм.

Литейная машина (рис. 108, *а*), предназначенная для литья под давлением, имеет подвижную *3* и неподвижную *5* плиты. Последняя может перемещаться по направляющим *4*. Расплавленный металл находится в тигле *7* и под давлением через плиту *5* подается в пресс-форму штоком, расположенным в цилиндре *6*. Управление машиной осуществляется с пульта *2*, а программа задается на щите управления *1*.

Схема литья показана на рис. 108, *б*. Пресс-форма состоит из двух частей *10* и *11*, которые крепятся к плитам *5* и *3*. Процесс литья происходит так. Раскрытую пресс-форму продувают сжатым воздухом, смазывают для более легкого извлечения отливки и смыкают. Поршень *8* движется вниз и жидкий металл *9* через лит-

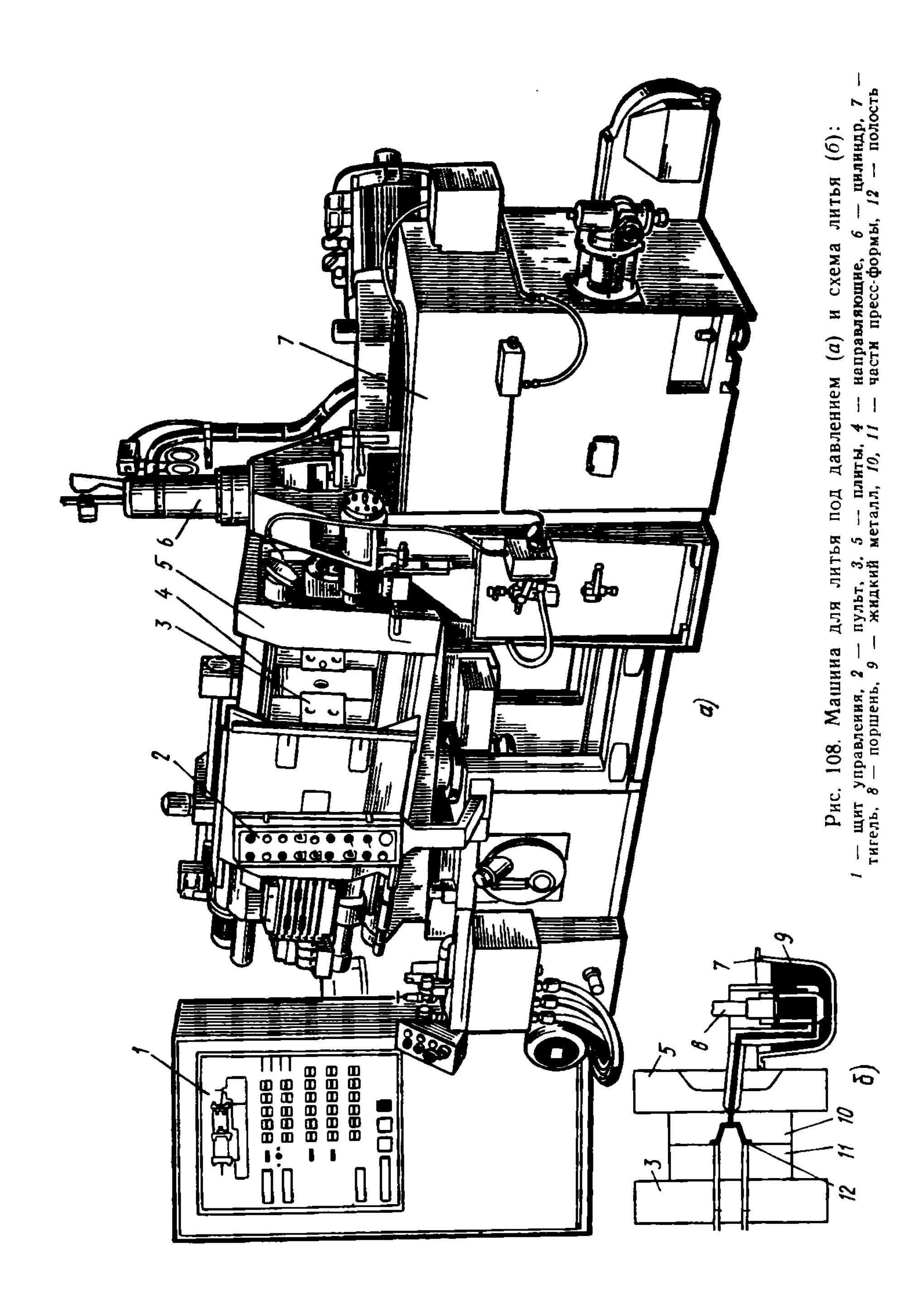


Рис. 108. Машина для литья под давлением (*а*) и схема литья (*б*):
1 — щит управления, *2* — пульт, *3*, *5* — плиты, *4* — направляющие, *6* — цилиндр, *7* — тигель, *8* — поршень, *9* — жидкий металл, *10*, *11* — части пресс-формы, *12* — полость

никовую систему подается в пресс-форму и заполняет полость *12*, которая имеет форму детали. После остывания металла раскрывают пресс-форму и извлекают из иее готовую заготовку. Для надежного извлечения отливки в пресс-форме имеются толкатели, которые выталкивают отливку при раскрытии пресс-формы.

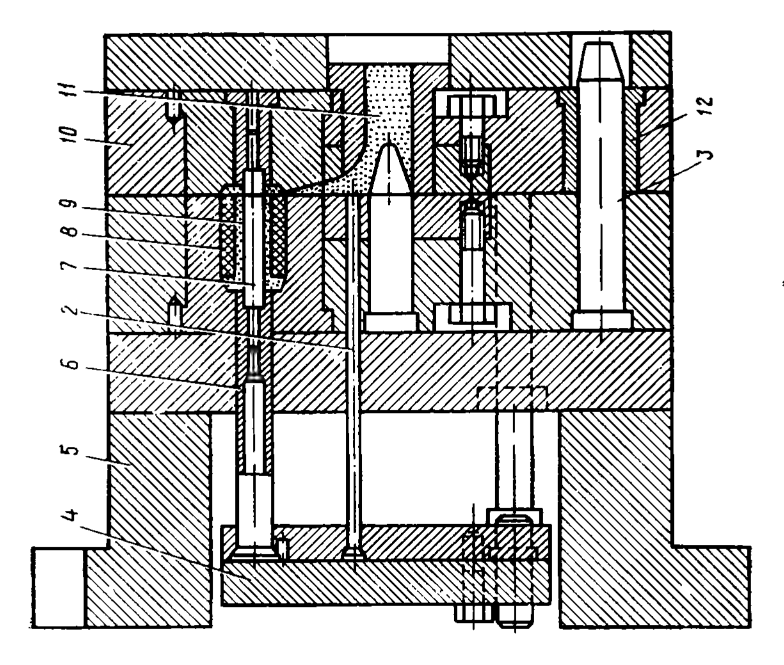
Пресс-форма — сложная и дорогая оснастка, работающая в условиях высокой температуры. Ее изготовляют в инструментальных цехах из инструментальиой стали. Литье под давлением, при котором используют дорогое оборудование и оснастку, экономически целесообразно в массовом производстве, так как получают детали высокого качества при относительно низкой трудоемкости. Процесс литья под давлением может быть автоматизировап.

В некоторых конструкциях машин (см. рис. 35) алюминиевый корпус отлит на сердечник статора. В этом случае перед смыканием пресс-формы в нее устанавливают сердечник, который фиксируют. После заливки сердечик и литой корпус представляют собой одно целое, поэтому не могут разбираться.

Очень часто при отливке подшипниковых щитов в места их сборки с подшипниками устанавливают стальные втулки (см. рис. 75 и 81), чтобы наружные кольца подшипников сопрягались не с алюминиевыми поверхиостями, имеющими недостаточную твердость и быструю изнашиваемость, а с более прочными стальными.

Заливку алюминием используют для крепления вала ротора и сердечника в машинах, показанных на рис. 76, 81 и 93. Такой способ крепления применяют, когда сердечник ротора изготовлен из хрупкого материала и его невозможно установить на валу посадкой с натягом. Кроме того, небольшой диаметр вала не обеспечивает нужной посадки с натягом и сохранения геометрической формы самого вала. При малых диаметрах валов креплеиие осуществляют заливкой пластмассы под давлением. При увеличении диаметра вала пластмасса не обеспечивает надежного соединения и его осуществляют заливкой алюминия. Кроме того, заливка алюминия происходит при более высокой температуре, чем пластмассы, что в разной степени отражается на магнитных свойствах сердечника. В сердечниках меньшего диаметра влияние температуры сказывается сильнее. В общем случае заливка пластмассы предпочтительнее, если обеспечивает необходимое крепление.

На рис. 109 показана четырехместная пресс-форма для скрепления вала и сердечника заливкой алюминия. Правая *10* часть пресс-формы (линия разъема показана жирной чертой) крепится к неподвижной плите литейной машины, а левая *5* — к подвижной. В раскрытую пресс-форму устанавливают вал *7* (в отверстие толкателя *6*) и сердечник *8*. Вал имеет в средней части накатку для лучшего сцепления с алюминием. Пресс-форму смыкают и через литник *11* производят заливку алюминия в полость *9* между валом и сердечником. После его остываиия подвижная часть пресс-формы движется влево, при этом плита *4* толкателя смещается от-



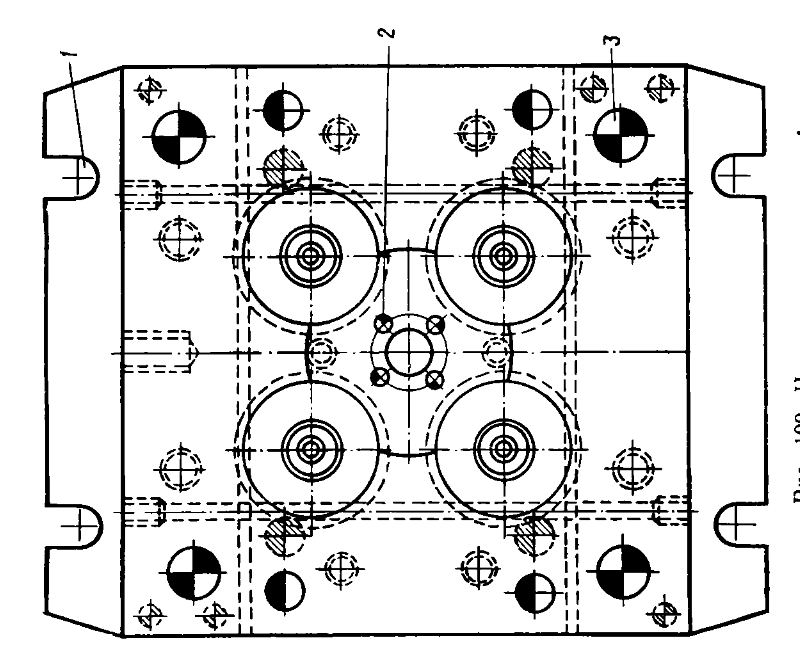


Рис. 109. Четырехместная пресс-форма для скрепления вала и сердечника заливкой алюминия:
1 — пазы, *2*, *6* — толкатели, *3* — колонки, *4* — плита толкателя, *5*, *10* — левая и правая части пресс-формы, *7* — вал, *8* — сердечник, *9* — полость, *11* — литник, *12* — втулка

носительно корпуса пресс-формы и толкатель *6* выталкивает ротор вправо, а толкатель *2* отделяет литник *11* от пресс-формы. Для точного смыкания пресс-формы на ее левой части имеются колонки *3*, которые входят во втулки *12*, расположенные на правой части. К плитам литейной машины пресс-форму крепят болтами, которые входят в пазы *1*. Пресс-форма является четырехместной: отливают четыре узла за один раз, что повышает производительность труда.

§ 47. Получение деталей прессованием и литьем пластмасс

При производстве микромашин из пластмассы изготовляют колодки зажимов, щеткодержатели, каркасы катушек, вентиляторы, а также заливкой пластмассы скрепляют коллекторные пластины, вал с сердечником и т. п.

Пластмассы обладают сравнительно высокими механическими и электроизоляционными свойствами, коррозионной и химической стойкостью, низкой гигроскопичностью, малой вязкостью, технологичностью и позволяют получать детали сложной формы.

Пластмасса обычно состоит из смолы (связующего вещества), наполнителей, пластификаторов и красителей. Смолы могут быть естественные и синтетические, содержание их в пластмассах колеблется от 30 до 60 %. Пластмассы в зависимости от химического свойства связующего делят на термореактивные и термопластичные.

Термореактивные пластмассы (реактопласты) под влиянием температуры и давления плавятся и заполняют форму, а при дальнейшем нагревании претерпевают химические превращения и переходят в нерастворимое состояние, сохраняя полученную в форму. Термореактивные пластмассы не могут быть подвергнуты вторичной переработке. Из пресс-формы их удаляют в горячем состоянии.

Термопластичные пластмассы (термопласты) под действием температуры и давления плавятся и хорошо заполняют форму, при охлаждении затвердевают. Изделия из термопластов можно многократно перерабатывать. Из пресс-формы детали удаляют в холодном состоянии.

Технология производства деталей из термореактивных пластмасс. Детали из термореактивных пластмасс изготовляют методами прямого прессования и литьем с помощью однопозиционных или литьевых машин. Методом прямого прессования выполняют простые детали, используя вертикальные однопозиционные прессы и простые по конструкции пресс-формы, при этом отходы практически отсутствуют. Литьем изготовляют сложные детали, используя вертикальные однопозиционные прессы или горизонтальные литьевые машины и более сложные пресс-формы. Литье на горизонтальных литьевых машинах — дорогой и сложный технологический процесс, требующий высокой культуры производства и приме-

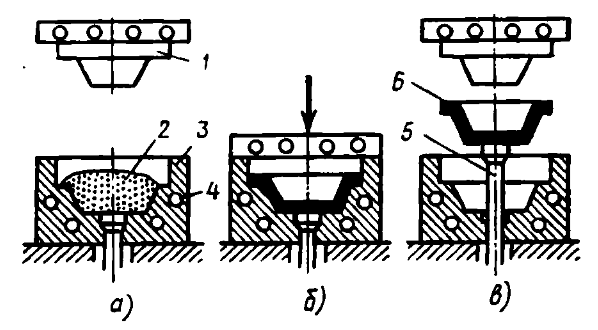


Рис. 110. Схема прямого прессования термореактивной пластмассы:

а — загрузка пресс-материала в пресс-форму, *б* — прессование детали, *в* — извлечение детали; *1* — пуансон, *2* — материал, *3* — матрица, *4* — нагреватели, *5* — выталкиватель, *6* — готовая деталь

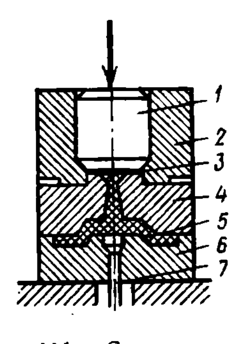


Рис. 111. Схема литьевого прессования термореактивной пластмассы:

1 — пуансон, *2* — загрузочная камера, *3* — пресс-материал, *4* — плита, *5* — формообразующая полость, *6* — матрица, *7* — выталкиватель

няемый обычно при производстве большого количества деталей. При литьевом методе возможны отходы пресс-материала.

Схема прямого прессования показана на рис. 110. В полость матрицы *3* пресс-формы загружают дозу порошкообразного или таблетированного материала *2* (рис. 110, *а*). Пресс-форму смыкают и под действием пресса пуансон *1* давит на прессуемый материал, а электрические нагреватели *4* поддерживают в пресс-форме заданную температуру (рис. 110, *б*). Под действием давления и теплоты нагретый в пресс-форме материал размягчается и заполняет формообразующую полость в пресс-форме. После определенной выдержки пресс-форма раскрывается и с помощью выталкивателя *5* (рис. 110, *в*) из нее извлекают готовую деталь *6*.

Процесс полимеризации (отвердения) сопровождается выделением летучих составляющих полимеров и паров влаги. В процессе прессования для удаления газов выполняют так называемую подпрессовку: раскрывают на 2—3 с пресс-форму на 5—10 мм после определенной выдержки в закрытом состоянии. Время выдержки под прессом, зависящее от вида перерабатываемого материала и толщины прессуемой детали, составляет от 0,5 до 2 мин на 1 мм толщины стенки детали.

При прессовании рабочую температуру пресс-формы поддерживают постоянной с помощью автоматических устройств. Технологическое время прессования может быть уменьшено, если в пресс-форму загружать материал не в виде порошка, а в виде таблеток, предварительно спрессованных на другом прессе и подогретых в специальных шкафах.

Схема литьевого прессования термореактивной пластмассы показана на рис. 111. Прессование литьем отличается от прямого

тем, что прессуемый материал загружают не в формообразующую полость пресс-формы, а в специальную загрузочную камеру 2. Под действием теплоты материал переходит в вязкотекучее состояние и за счет давления со стороны пуансона 1 выжимается из загрузочной камеры 2 через узкое отверстие в литниковой плите 4 в формообразующую полость 5. После отвердения готовую деталь извлекают с помощью выталкивателя 7 из матрицы 6. В отличие от прямого прессования в результате перетекания прессуемого материала через узкое калиброванное отверстие его структура становится более однородной, происходит хорошее заполнение формообразующей полости, что позволяет получать детали сложной конфигурации с глубокими отверстиями, в том числе и резьбовые. Как правило, отпадает необходимость подпрессовки, поскольку образующиеся газы выходят в зазор между литниковой плитой и матрицей пресс-формы. К недостаткам литьевого прессования по сравнению с прямым относят большой расход материала, так как в загрузочной камере остается часть пресс-материала 3, который невозможно использовать вторично.

При необходимости пластмассовые детали прессуют с закладными деталями. Например, при прессовании щеткодержателей (см. рис. 52, *в*) в пресс-форму до засыпки материала устанавливают в специальные гнезда зажим 10 для выводного провода, а затем пресс-материал, из которого выполняют втулку 8, и производят прессование. Так же прессуют колодки зажимов для выводов обмотки и подключения машины к сети.

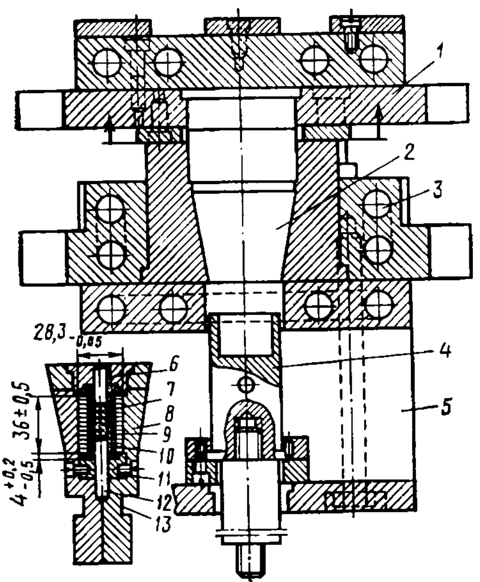


Рис. 112. Пресс-форма для скрепления вала и сердечника пластмассой:

1 — пуансон, *2* — загрузочная камера, *3* — нагревательные элементы, *4* — прижим, *5* — матрицы, *6* — литник, *7* — пластмасса, *8* — части пакета, *9* — втулка, *10* — сердечник, *11* — вкладыши, *12* — вал, *13* — пазы

Прессуя пластмассу, скрепляют коллекторы (см. гл. XV), а также сердечники роторов и валы.

Рассмотрим процесс скрепления сердечника ротора и вала. Пресс-форма состоит из пуансона 1 (рис. 112) и матрицы 5 (разъем показан жирной линией). Нагревательные элементы 3 обеспечивают необходимую температуру. В матрице имеется загрузочная камера 2, в которую устанавливают пакет формы, состоящий из частей 8. До установки пакета в пресс-форму производят его сборку с прессующими деталями. В одну часть пакета устанавливают сердечник 10 и вал 12. Если сердечник собирают из отдельных листов, то до установки в пакет их скрепляют металлической втулкой 9, которую по краям развальцовывают. Затем устанавливают вторую часть пакета и опускают сверху в раскрытую загрузочную камеру 2. Прижим 4 захватывает пакет за пазы 13 и, опускаясь вниз, скрепляет его. Пресс-форму смыкают и через литник 6 заполняют пластмассой 7 промежуток между валом и сердечником.

Для извлечения ротора после опрессования раскрывают пресс-форму, при этом прижим 4 подает вверх пакет, который разбирают. В пакете имеются поверхности, которые изнашиваются раньше, чем другие менее нагруженные. Чтобы не менять весь пакет при износе некоторых поверхностей, их оформляют легко заменяемыми фасонными вкладышами 11.

Технология производства деталей из термопластичных пластмасс. Самый распространенный способ получения деталей из термопластов — литье под давлением на червячных литьевых машинах. Это высокоэффективный технологический процесс массового производства, который легко может быть автоматизирован. Схема литьевой червячной машины показана на рис. 113. Материал в виде гранул засыпают в бункер 7, откуда червячным дозатором 8, который приводится во вращение червячной парой 10, передвигают по нагревательному цилиндру 11. Материал по мере продвижения по цилиндру нагревается нагревателями 6 и пластифицируется (плавится и переходит в вязкотекучее состояние). Расплавленный материал периодически проталкивается поршнем 9, который подает червячный дозатор 8 в центральный канал с соплом 4 и в полость пресс-формы 5. Заполненную форму некоторое время выдерживают под напорным давлением материала, при этом она охлаждается водой, протекающей по каналам 2, изделие в форме остывает и твердеет. По окончании застывания изделия поршень 9 отходит вправо и одновременно размыкаются части 1 и 3 пресс-формы. Изделие выбрасывается толкателями из полости пресс-формы, она смыкается, и повторяется процесс прессования. Машина может

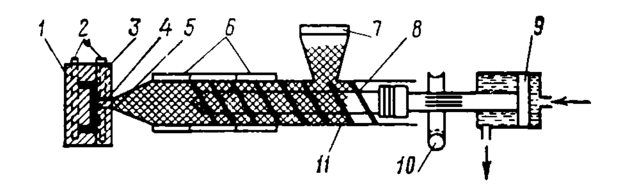


Рис. 113. Схема литьевой червячной машины для литья термопластичной пластмассы:

1, 3 — части пресс-формы, *2* — каналы, *4* — сопло, *5* — пресс-форма, *6* — нагреватели, *7* — бункер, *8* червячный дозатор, *9* — поршень, *10* — червячная пара, *11* — цилиндр

работать в автоматическом цикле. Цикл в зависимости от массы детали составляет от 15 до 30 с.

При прессовании пластмасс форма и размеры прессуемых деталей зависят от формообразующих деталей пресс-форм, поэтому к ним предъявляют высокие требования по точности и качеству поверхностей. Формообразующие детали изготовляют из высоколегированных инструментальных сталей с последующей закалкой до высокой твердости. Для повышения износостойкости и улучшения внешнего вида прессуемых деталей формообразующие элементы пресс-форм полируют и хромируют.

§ 48. Получение деталей прессованием металлопорошков

Способ получения деталей состоит в том, что из металлического порошка или смеси порошков прессуют заготовки, которые затем подвергают термической обработке — спеканию. Для машин малой мощности прессованием металлопорошков изготовляют подшипники трения, коллекторные пластины, постоянные магниты, магнитопроводы роторов, некоторые конструкционные детали.

Исходными материалами являются металлические порошки, состоящие из мелких частиц (0,5—500 мкм) различных металлов и их оксидов. Прессование осуществляют в пресс-формах на прессах различной конструкции при давлении от 200 до 1000 МПа в зависимости от формы, размеров и требуемой плотности прессуемой заготовки. При прессовании порошка увеличивается контакт между частицами, уменьшается пористость, деформируются и разрушаются отдельные частицы. Прочность заготовки обеспечивается силами механического сцепления порошков, электростатическими силами притяжения и трения.

Для повышения прочности заготовки спекают. Спекание заготовок рекомендуется проводить в три этапа: первый — нагревание до 150—200 °С (удаление влаги); второй — нагревание до 0,5 от температуры спекания (снятие упругих напряжений и активное сцепление частиц); третий — окончательное нагревание до температуры спекания (0,6—0,8 от температуры плавления). Время выдержки после достижения температуры спекания составляет 30—90 мин.

Готовые детали практически можно подвергать всем видам механической обработки. Однако стараются избегать обработки со снятием стружки, так как деталь имеет достаточно точные размеры. Если ее невозможно избежать, следует учитывать, что охлаждающие жидкости, впитываясь в поры, вызывают коррозию. Как правило, прессованные детали подвергают отделочным операциям, в частности калиброванию.

Заготовки калибруют в пресс-формах или продавливают через калибрующие отверстия. При калибровке повышается точность

размеров и уплотняется поверхностный слой заготовки. При обработке прессованной заготовки резанием используют инструмент, оснащенный пластинками из твердого сплава или алмаза. Для сохранения ее пористости при обработке следует применять хорошо заточенный и доведенный инструмент.

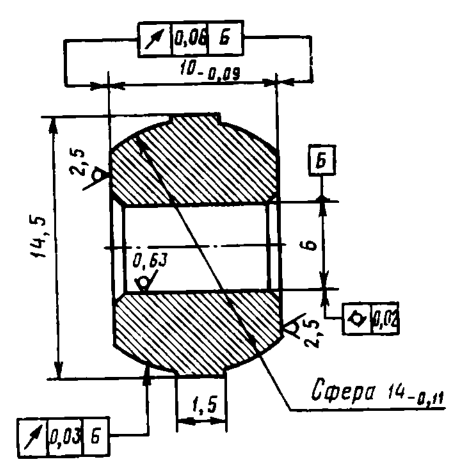


Рис. 114. Подшипник скольжения, прессованный из металлопорошка

Прессованием металлопорошков можно получать детали с различными свойствами. Подшипники скольжения прессуют, обеспечивая заданную пористость, а затем пропитывают маслом. Масло в подшипниках и дополнительная смазка в сальниках гарантируют работу подшипников в течение всего срока службы двигателя. Прессование выполняют из композиций порошков БГр-4, ЖГр-1 и др.

Рассмотрим технологию изготовления подшипника для двигателя, используемого в кофемолке. Прессуемый порошок имеет следующий химический состав (%): медный порошок — 86, оловянный порошок — 10, карандашный графит — 4. Перед смешиванием графит отжигают 2 ч в печи при 850 °С, а медный и оловянный порошки сушат 2 ч при 100—150 °С. Затем компоненты просеивают через сито с определенной сеткой и перемешивают в барабане в течение 2—3 ч. Производят прессование, спекание и калиброванне внутреннего отверстия спрессованной детали. Последней операцией является пропитка маслом. Детали моют в бензине, сушат и горячими загружают в вакуумную установку. Создают в установке вакуум (до 70 кПа), выдерживают в ней детали в течение 1 ч; заливают масло, в котором детали должны находиться 30 мин. Детали остаются в масле еще 3 ч без вакуума.

На рис. 114 показан сферический подшипник скольжения, прессованный из металлопорошка. Точные размеры внутреннего отверстия подшипника, его наружный диаметр, торцы и их взаимное расположение получают механической обработкой — калибровкой. В массовом производстве используют специальные калибровочные автоматы, производительность которых не менее 3000 деталей в час. Базовой поверхностью при обработке остальных поверхностей подшипника служит его внутренняя поверхность, изготовляемая с точностью по 6-му квалитету с чистотой поверхности $R_a = 0,63$.

Контрольные вопросы

1. Какие детали электрических машин изготовляют литьем цветных металлов?
2. Какие оборудование и оснастку используют при литье под высоким давлением?
3. Какими свойствами обладают детали из пластмассы?
4. Как получают детали из термопластичных пластмасс?
5. Как получают детали из термореактивных пластмасс?
6. Какие детали машин изготовляют из металлических порошков?

ГЛАВА XII. ТЕХНОЛОГИЯ ШТАМПОВКИ

§ 49. Краткая характеристика некоторых холодноштамповочных операций

Под холодной штамповкой понимают штамповку материала при температуре окружающей среды без специального подогрева. Холодную штамповку подразделяют на листовую (листового материала) и объемную (сортового материала). Основными разновидностями листовой штамповки являются операции вырубки, пробивки, гибки, вытяжки, а объемной штамповки — высадка, прессование, чеканка и др.

Холодная штамповка — прогрессивный технологический процесс, обеспечивающий высокую точность деталей при высокой производительности труда.

При производстве электрических машин штамповкой изготовляют листы статора и ротора, кожухи и лопатки вентиляторов, наконечники, втулки, крышки подшипников, болты и гайки и т. п.

Штамповку осуществляют на эксцентриковых прессах. При включении пресс производит удар, используя кинетическую энергию вращающегося маховика. Эта энергия передается через эксцентриковый вал ползуну, который за один поворот вала опускается и поднимается, совершая двойной ход. В качестве инструмента используют штампы, состоящие из пуансона и матрицы. Пуансон крепится к ползуну, а матрица — к столу пресса.

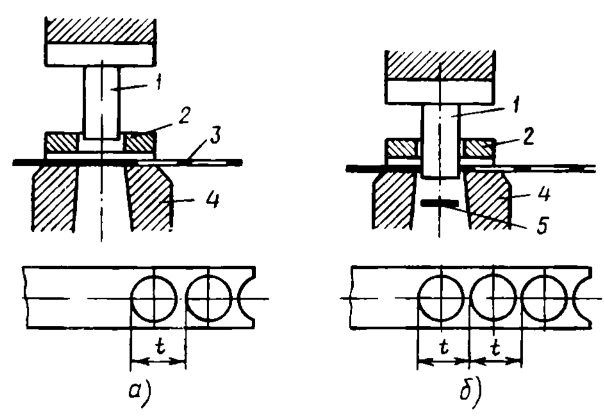


Рис. 115. Схема штамповки простым штампом:
а — начало штамповки, *б* — конец штамповки

Рассмотрим схемы штамповки вырубными штампами. На рис. 115 показана схема простого штампа, которым можно пробить отверстие или вырубить деталь, имеющую замкнутый контур. Материал, из которого выполняют штамповку в виде ленты *3*, помещают между пуансоном *1* и матрицей *4* (рис. 115, *а*). При включении пресса пуансон движется вниз, достигает материала и, продолжая движение, сминает его, а затем срезает. Между пуансоном и матрицей имеется небольшой зазор, зависящий от толщины штампуемого материала (обычно от 0,01 до 0,2 толщины материала) и его свойств. Пуансон может углубляться в матрицу на толщину материала (рис. 115, *б*). Получившаяся вырубка *5* проталкивается через матрицу вниз, преодолевая сопротивление трения о ее стенки. Пуансон поднимается вверх вместе с лентой, в которой он произвел вырубку. Для снятия ленты с пуансона служит съемник *2*. Когда нижняя плоскость пуансона поднимается выше нижней плоскости съемника, лента сбросится с пуансона на матрицу. Затем ленту перемещают на шаг *t* штамповки и производят вырубку следующей детали. При такой схеме штамповку осуществляют со скоростью нескольких сот ударов в минуту. Опускание детали вниз через матрицу называют удалением на «провал».

Если требуется вырубить деталь с наружным и внутренним контурами (отверстиями), необходимы два простых штампа или их последовательное объединение в один штамп, называемый штампом последовательного действия (рис. 116, *а*). Этот штамп

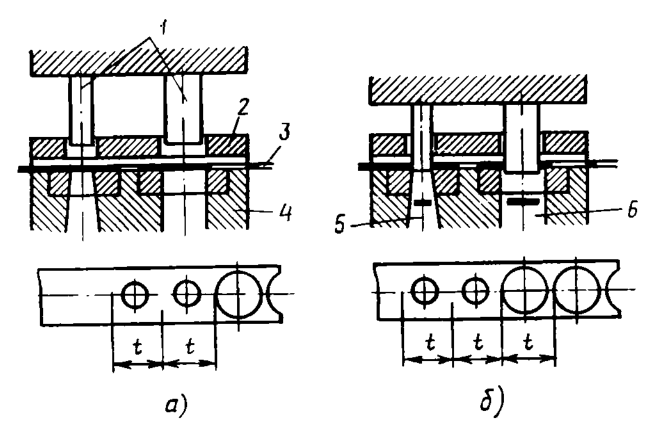


Рис. 116. Схема штамповки штампом последовательного действия:
а — начало штамповки, *б* — конец штамповки

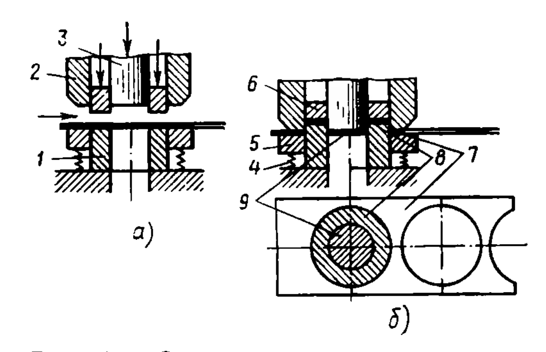


Рис. 117. Схема штамповки совмещенным штампом:

а — начало штамповки, *б* — конец штамповки; *1* — пуансон-матрица, *2* — матрица, *3* — пуансон, *4* — пружина, *5, 6* — объемники, *7* — лента, *8* — деталь, *9* — выштамповка

имеет те же элементы, что и простой. Пуансоны *1* располагают на расстоянии, кратном шагу *t* штамповки. Съемник *2* является общим для обоих пуансонов. Матрица *4* имеет два отверстия под пуансоны. Штамповку выполняют из ленты *3*. Первый пуансон вырубает внутреннее отверстие в детали, и вырубка *5* уходит на «провал» в матрицу; второй пуансон вырубает наружный контур детали и деталь *6* также уходит на «провал» (рис. 116, *б*). Штамп, показанный на рис. 116, имеет две позиции.Число позиций может быть большим.

Деталь с отверстием можно вырубить штампом совмещенного действия (объединив два простых штампа в один, рис. 117, *а, б*). Внутренний диаметр детали вырубают пробивным пуансоном *3* и пуансоном-матрицей *1*, а наружный — пуансоном-матрицей *1* и матрицей *2*. Съемник *5* освобождает пуансон-матрицу *1* от отходов ленты *7*, а съемник *6* — пуансон *3* от детали *8*. Съемник *5* имеет пружину *4*. Выштамповка *9* уходит на «провал», а готовая деталь *8* остается на пуансоне-матрице *1*. Ее необходимо убрать из зоны резания при раскрытом штампе любым способом (снять пинцетом, сдуть сжатым воздухом и др.). Однако эти способы замедляют скорость штамповки до нескольких десятков ударов в минуту. На практике штамповка последовательными штампами более производительна (в 5—15 раз), чем штамповка совмещенными штампами. Однако совмещенные штампы применяют при штамповке конструкционных деталей и электротехнической стали в опытном и мелкосерийном производстве. В массовом производстве используют штампы последовательного действия.

§ 50. Штамповка электротехнической стали

В зависимости от конструкции электрических машин штамповкой изготовляют: листы статора и ротора (см. рис. 9, 33, 34 и др.); либо листы статора (см. рис. 81), а ротор выполняют из литых постоянных магнитов; либо листы ротора (см. рис. 82), а статор выполняют также из постоянных магнитов.

Рассмотрим наиболее сложую операцию — штамповку листов статора и ротора на автоматической штамповочной установке.

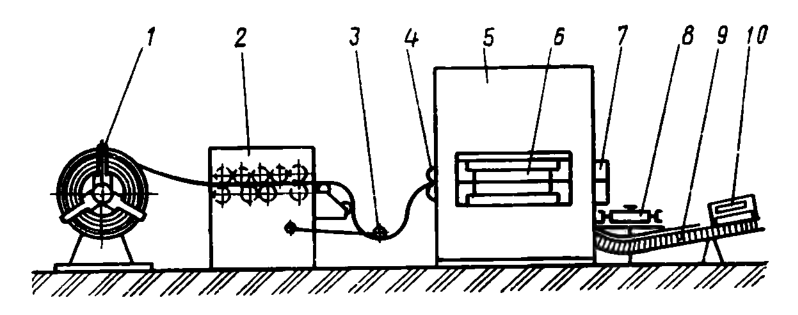


Рис. 118. Схема штамповки на автоматической штамповочной установке:

1 — разматыватель, *2, 3, 4, 7, 9* — устройства, *5* — пресс, *6* — штамп, *8* — транспортер, *10* — шаблон

Штамповку выполняют из ленты шириной, близкой к наружному диаметру штампуемой детали. Рулон ленты устанавливают на разматыватель *1* (рис. 118) и крепят разжимными кулачками по внутреннему диаметру. Разматыватель, имеющий привод, который работает синхронно с подачей ленты в пресс, разматывает ее при штамповке. Из разматывателя лента проходит правильное устройство *2*, образует компенсирующую петлю, размер которой регулирует устройство 3, и через подающее устройство *4* поступает в штамп *6* последовательного действия, где происходит вырубка листов статора и ротора. Отштампованные ориентированные листы по стапелирующему устройству *9* выносятся из зоны пресса *5*. Отходы ленты устройством *7* разрубают на куски и по транспортеру *8* отправляют на пакетирование и последующую утилизацию. Шаблон *10* служит для взятия дозы отштампованных листов и передачи их на последующие операции.

Компенсирующая петля необходима для согласования непрерывного движения ленты правильного устройства и прерывистой ее подачи в штамп. Подающее устройство *4* после каждого хода пресса подает ленту в штамп на шаг штамповки. Точность подачи име-

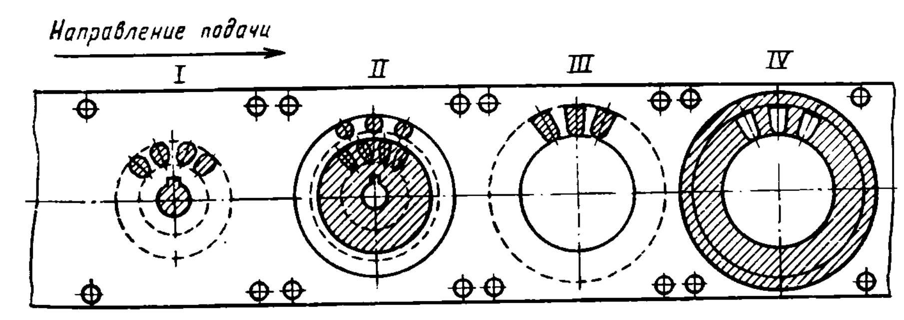


Рис. 119. Четырехпозиционная схема штамповки листов статора и ротора

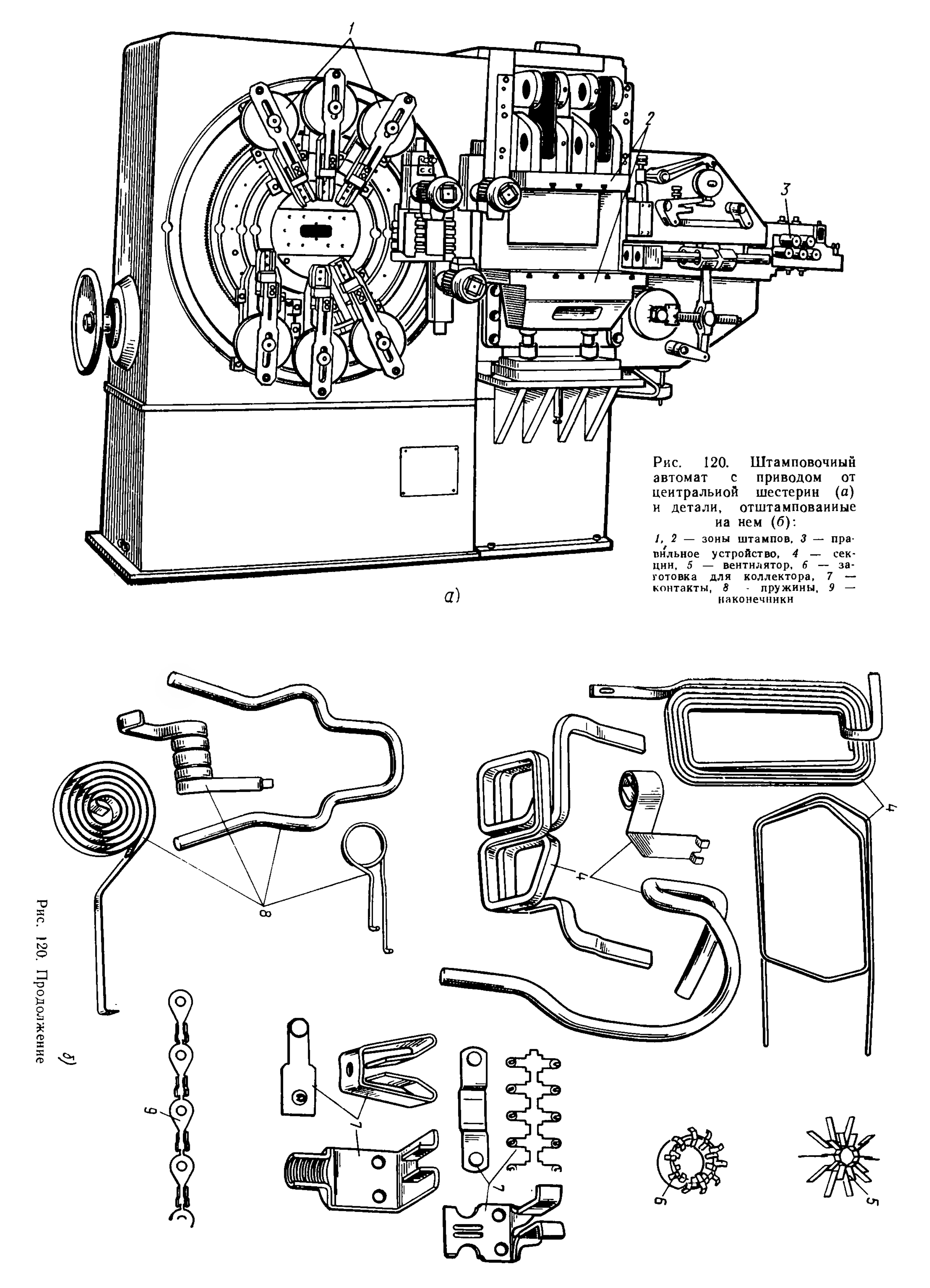


Рис. 120. Штамповочный автомат с приводом от центральной шестерни (*а*) и детали, отштампованные на нем (*б*):

1, *2* — зоны штампов, *3* — правильное устройство, *4* — секции, *5* — вентилятор, *6* — заготовка для коллектора, *7* — контакты, *8* — пружины, *9* — наконечники

Рис. 120. Продолжение

ет большое значение для качества штампованных листов и должна быть не более 0,05.

При штамповке листов статора и ротора возможны различные схемы штампов. Как правило, используют четырехпозиционную схему (рис. 119), в которой штамповку производят за четыре удара. На позиции *I* штамп вырубает пазы роторного листа, центральное отверстие под вал и отверстие в ленте под ловители; на позиции *II* — наружный контур роторного листа (при этом лист ротора удаляют на «провал») и предварительно пазы статора. На позиции *III* штамп окончательно вырубает пазы статорного листа и калибрует его внутренний диаметр, на позиции *IV* — наружный контур статорного листа, и лист удаляют из штампа на «провал».

Использование ленты и пресса-автомата позволяет штамповать со скоростью 200—400 ударов в минуту. Другое преимущество штамповки на автоматах — возможность получать после штамповки сориентированные листы, что позволяет автоматизировать последующие операции и резко снижать трудоемкость изготовления сердечников.

При штамповке только листа ротора или статора применяют такое же оборудование и схему штамповки. Для штамповки листа ротора штамп имеет позиции *I* и *II* (рис. 119), а для штамповки листа статора — *III* и *IV*. При штамповке листа статора получаются большие отходы в виде кружка при вырубке внутреннего отверстия, что является недостатком таких конструкций, поэтому всегда стараются использовать отходы для штамповки какой-либо другой детали.

Оператор, работающий на листоштамповочной установке, периодически визуально и органолептически (ощупью) контролирует качество отштампованных деталей. Визуально определяют видимые дефекты (отсутствие или неполноту каких-либо элементов вырубки, вмятины и т. п.), а органолептически — величину заусенцев (допустимая их величина указывается в чертеже; обычно не более 0,04 мм).

Отштампованные листы передают на последующие операции — подготовку листов к сборке сердечников или непосредственно на сборку.

§ 51. Штамповка конструкционных деталей

При изготовлении деталей для машин применяют все виды холодной штамповки. Детали небольших размеров целесообразно изготовлять на автоматах. Штамповочный автомат с приводом от центральной шестерни и детали, изготовленные на нем, показаны на рис. 120, *а, б*. Для штамповки на автомате используют ленту или прямоугольную либо круглую проволоку. Материал проходит правильное устройство *3*, поступает в зону *2* размещения нескольких штампов (на рисунке штампы не показаны), расположенных горизонтально, а затем в зону *1* нескольких штампов, расположенных по окружности (общая матрица представляет собой кольцо; пуансоны размещены по окружности, охватывающей его). Последовательно выполняют операции пробивки, гибки, сборки, сварки, навивки и т. п. Автоматы позволяют существенно увеличить производительность благодаря объединению различных операций при изготовлении сложных деталей.

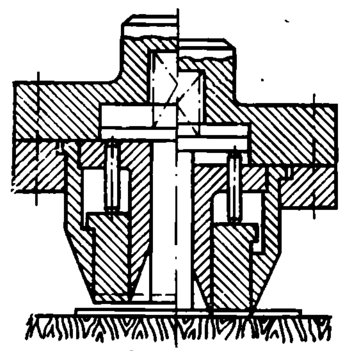


Рис. 121. Вырезка (просечка) ножевыми штампами

Выпускают автоматы усилием до 1 МН, использующие ленту толщиной до 2 и шириной до 100 мм. Производительность автоматов от 120 до 1000 деталей в минуту в зависимости от их сложности.

При производстве машин применяют неметаллические материалы, например: электрокартон, бумагу, слоистые пластинки (текстолит, стеклотекстолит, асботекстолит), слюду, миканиты, войлок, резину, кожу и др. Материалы поступают на заводы в виде листов, полос или рулонов. Для изготовления из них деталей используют операции резки, штамповки, гибки.

Для получения большого количества деталей применяют автоматическую штамповку. Небольшое количество простых деталей можно изготовить вырезкой (просечкой) с помощью ножевых штампов упрощенной конструкции (рис. 121). Угол заострения ножей для мягких материалов принимают 10—12°, для более жестких — 30—35°. Вырезку бумажных и других тонколистовых прокладок толщиной 0,1—0,2 мм производят пачками (до 50 листов) двумя способами: штамповкой насквозь на фибровой или деревянной прокладке и штамповкой половины листов утолщенной пачки (другая половина листов служит подкладкой).

Контрольные вопросы

1. Какие преимущества по сравнению с другими технологическими процессами имеет холодная штамповка?
2. Как выполняют штамповку простыми, совмещенными и последовательными штампами?
3. Приведите пример последовательности операций при штамповке электротехнической стали четырехпозиционным штампом.
4. Какое оборудование и оснастку применяют при изготовлении небольшого количества деталей из неметаллических материалов?

§ 52. Требования, предъявляемые к сердечникам

К сердечникам, набираемым из листов, предъявляют следующие основные требования: минимальное смещение листов относительно друг друга; надежную изоляцию между листами; высокие плотность и коэффициент заполнения сердечника сталью; надежное скрепление листов между собой, с корпусом или валом. Особенно жесткие требования предъявляют к сердечникам, в которые обмотку укладывают механизированным способом.

Смещение листов относительно друг друга должно быть минимальным во избежание уменьшения площади паза. Размеры пазов в собранных сердечниках получаются меньше, чем в штампованных листах (рис. 122), что объясняется сдвигами между листами вследствие зазоров между шпоночными канавками листов и шпонками оправок, неточностями штамповки и заусенцами, которые при прессовании сминаются. Поэтому различают размеры паза в штампе $b_ш$ и $h_ш$ (размеры паза в одном листе после штамповки) и свету $b_п$ и $h_п$ (размеры паза в собранных сердечниках). Разница между этими размерами составляет 0,05—0,2 мм в зависимости от диаметра листов, способа штамповки и качества сборки.

Сердечник должен быть плотным и монолитным. Он не должен перекашиваться при межоперационных транспортировках и запрессовке в корпус и иметь распушения зубцов («веер»), которое возможно при прессовании. Распушение зубцов понижает плотность прессования, является причиной шумов при работе электрической машины и создает опасность прорезания изоляции катушек. Для уменьшения распушения применяют ряд мер, которые рассматриваются при описании конкретной технологии.

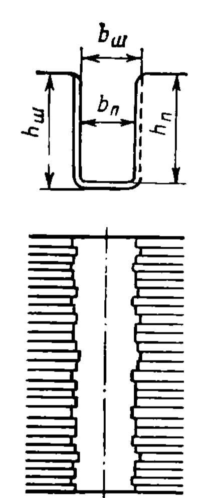


Рис. 122. Размеры паза в штампе и свету

К сердечникам некоторых машин предъявляют требования магнитной симметрии сердечников во всех радиальных направлениях.

Коэффициент заполнения сердечника сталью зависит от толщины электроизоляционного покрытия. Чем тоньше покрытие, тем выше этот коэффициент.

Технология сборки и скрепления сердечника зависит от конструкции машины, габаритов сердечника, толщины листов и последующих технологических операций.

При изготовлении сердечника следует правильно выбирать усилие прессования, так как чрезмерно большие усилия приводят к увеличению потерь, а недостаточные усилия не позволяют получить сердечник необходимой плотности.

§ 53. Подготовка листов к сборке

Подготовка листов к сборке зависит от конструкции машины, применяемой электротехнической стали и требований к сердечникам. Трехфазные и однофазные электродвигатели общего назначения с высотой оси вращения 71 мм и ниже имеют сердечники, штампованные из электротехнической стали марки 2013. Если сталь имеет изоляционное покрытие, нанесенное на металлургических заводах, термически обработана, то после штамповки листы поступают на сборку. В противном случае сталь следует термически обработать и нанести на нее изоляционное покрытие. Эти две операции совмещают.

Термическая обработка состоит из трех операций: обжига для очистки поверхностей от загрязнений; отжига для улучшения магнитных свойств и уменьшения потерь; оксидирования для создания оксидной изоляционной пленки. На термическую обработку листы поступают на стойках или связанными в пачки. Температура и время выдержки при этой температуре, среда, скорость нагрева и охлаждения должны обеспечить обезуглероживание и удаление вредных примесей, рекристаллизацию, образование оксидных пленок.

Разработан типовой технологический процесс для термической обработки стали марки 2013. В качестве оборудования используют специальные рольганговые проходные печи с защитной атмосферой. Режим термообработки следующий: обжиг 15—30 мин при (320 ± 20)°С; отжиг 90—120 мин при (850 ± 20)°С; охлаждение в защитной атмосфере до 500—550°С со скоростью не более 100°С в час; оксидирование 20 мин при 500—550°С и охлаждение в воздушной среде до 80°С.

Типовая технология на ряде заводов уточняется в зависимости от конфигурации листов и требования к стали. Ее также можно использовать для термообработки сталей других марок, близких к 2013.

Листы из сталей с высокой магнитной проницаемостью и повышенной индукцией насыщения (типа пермаллой) и сталей для постоянных магнитов (типа викаллой) чувствительны к механическим воздействиям. В процессе переработки не допускается их бросать, перегибать, изгибать, наносить удары. При ведении технологического процесса термообработки необходимо точно соблюдать режимы, так как сплавы чувствительны к незначительным отклонениям.

Листы из пермаллоя подвергают высокому отжигу в вакууме при нагреве со скоростью не выше 500°С в час и после достижения температуры 1125°С выдерживают 3—6 ч, затем охлаждают до 600°С со скоростью не более 200°С в час и ниже (со скоростью не менее 400°С в час). В вакуумной печи без воздуха нагрев осуществляют только лучистой энергией, а охлаждение — продувкой нейтрального газа — аргона, который является теплоносителем при охлаждении. При этом выравнивается давление.

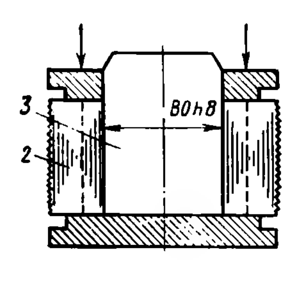
Листы из викаллоя подвергают отпуску. Обработке подлежат листы, собранные на немагнитную латунную втулку *9* (см. рис. 112), которую по краям развальцовывают. Режим термообработки викаллоя зависит от его плавки и типа двигателя. Примерный режим следующий: нагрев в среде воздуха до 590°С и выдержка при этой температуре в течение 1 ч. После отпуска повторяют развальцовку трубки, так как под влиянием температуры она может ослабнуть.

§ 54. Дозирование сердечников статора и ротора

В конструкторском чертеже указывается длина сердечника и его масса. Массу сердечника определяют взвешиванием дозы листов на весах с точностью, равной массе одного листа, а длину — при прессовании. При этом усилие прессования должно быть в пределах заданных технологией. В автоматизированном производстве доза листов не взвешивается, а берется мерной разжимной оправкой и определяется длина сердечника при заданном давлении. При несоответствии длины заданному размеру ее корректируют, добавляя или снимая листы.

После взвешивания производят подбор листов. Каждый сердечник должен быть собран из листов, вырубленных одним штампом. Листы должны располагаться заусенцем в одну сторону и быть ориентированы на пазах так, как они вырубались в штампе. Сердечник можно получить более высокого качества, если подбирать листы в той же последовательности, в которой они выходили из штампа. В этом случае на качество сердечника не влияет изменение размеров пазов от износа штампа и его заточки.

Для правильной сборки листов статора на его наружной поверхности в определенном месте вырубают специальный знак любой формы (полукруг, треугольник, прямоугольник). При повторном изготовлении такого же штампа этот знак вырубают в другом месте. По расположению знаков различают листы, вырубленные одним штампом. После взвешивания дозы листов и их подбора осуществляют их ориентирование. Для точного ориентирования подобранные листы *2* (рис. 123) надевают на оправку *3*, которая имеет посадочный размер не хуже 8-го квалитета. Оправка ориентирует листы по радиальным направлениям, а для их ориентирования по углу на оправке устанавливают две шпонки, которые входят в шлицы пазов. Одна *1* из шпонок оправки закреплена жестко, а другая *4* — плавающая. При сборке на оправку базирование листов происходит по их внутренней поверхности, поэтому она получается более ровной, чем наружная. Все неточности штамповки и сборки концентрируются на наружной поверхности.



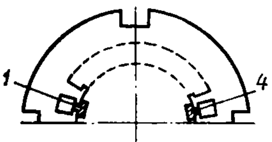


Рис. 123. Оправка с сердечником статора

Электротехническая сталь имеет разную толщину по ширине ленты. При сборке сердечников возможно, что одна их сторона окажется большей длины, чем другая, противоположная ей. Разная длина сердечника по окружности не имеет значения при ручной укладке обмоток, но влияет на качество процесса при механизированной. Для выравнивания сердечников по длине после сборки листов поворачивают половину сердечника на 180°. Подобранный таким образом сердечник прессуют и скрепляют.

В некоторых машинах, например асинхронных тахогенераторах, необходимо, чтобы магнитная система была симметричной в радиальном направлении (это улучшает основные показатели машины). Электротехническая сталь имеет различную магнитную проводимость вдоль и поперек прокатки. Если это обстоятельство в других машинах не играет существенной роли и допускается, то в тахогенераторах оно недопустимо. Магнитную проводимость выравнивают, производя веерную сборку. Листы подбирают по знаку так, чтобы каждый последующий лист был повернут относительно предыдущего на определенный угол, который отсчитывают по штамповочному знаку (если листы не имеют пазов) или на один паз (если листы имеют пазы). Правильность сборки проверяют по расположению знака на наружной поверхности сердечника (обычно он расположен по спирали). Сдвиг листов может быть другим, его указывают в чертеже. При веерной сборке расшихтовка получается несколько бо́льшей, чем в сердечниках, собранных по технологии, описанной ранее, но с этим приходится мириться.

Подборку листов ротора производят так же, как и листов статора, по знаку, который выштамповывают на внутреннем или наружном диаметре листов. Элемент, на котором осуществляют точное ориентирование листов, зависит от конструкции ротора. Во всех случаях точное ориентирование производят по внутреннему диаметру и шлицам. Для ориентирования по шлицам в них устанавливают шпонку, которую, как правило, извлекают после прессования и скрепления сердечника.

При необходимости скос пазов на роторе получают, располагая на оправке под углом шпонку, на которую собирают листы специальным пазом, выштампованным на их внутренней поверхности. Ориентированные таким образом листы отправляют на прессование и скрепление.

§ 55. Скрепление сердечников статора и ротора

Скрепление листов статора и получение сердечника производят заливкой алюминия, сваркой, заклепками, скобами или склеиванием. Перед скреплением листы прессуют и, не снимая усилия, скрепляют. Усилие прессования очень важно для получения качественного сердечника. На заводах используют различные усилия в зависимости от применяемого материала листов, их конфигурации и способа крепления. Четких рекомендаций на каждый случай дать трудно. В каждом случае технолог отрабатывает процесс и рассчитывает усилие прессования, принимая обычно давление в пределах 1—1,5 МПа.

Рассмотрим способы скрепления листов статора.

Скрепление заливкой алюминия. Собранные на оправку листы предварительно прессуют, а в некоторых случаях фиксируют длину. Затем листы с оправкой устанавливают в литейную машину. При смыкании пресс-формы происходит прессование листов до заданного размера и заливается алюминий (см. § 46).

Скрепление сваркой. Для скрепления сваркой в листах выштамповывают специальные канавки (рис. 124, *а*). Подобранные на оправку листы прессуют и, не снимая давления, выполняют сварку (неплавящнмися вольфрамовыми электродами в среде защитного газа — аргона или углекислого газа) сердечника сразу в четырех местах. Сварной шов образуется вследствие расплавления основного материала. После остывания сваренных швов сердечнчк снимают с оправки.

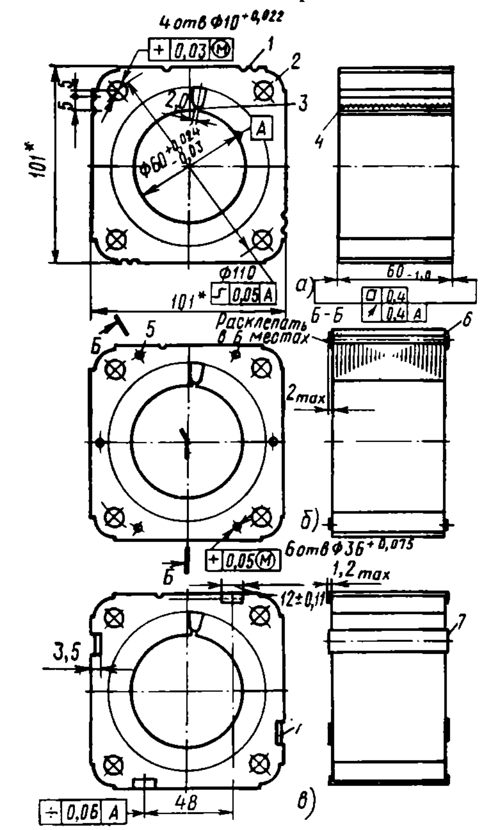


Рис. 124. Скрепление сердечников:
а — сваркой, *б* — заклепками, *в* — скобами; *1* — выштамповка под сварку, *2* — отверстие для крепления щитов, *3* — шлиц паза, *4* — сварной шов, *5* — отверстия для заклепок, *6* — заклепки, *7* — скобы

Скрепление заклепками. Для скрепления заклепками в листах выштамповывают несколько отверстий *5* (рис. 124, *б*). Отверстия после штамповки имеют точность по 10—11-му квалитету, поэтому при сборке служат не базой, а только для крепления. После прессования, не снимая давления, устанавливают заклепки *6* и расклепывают их. Затем сердечник снимают с оправки. Заклепки должны выступать из сердечника не более чем на 2 мм.

Скрепление скобами. Для скрепления скобами в листах выштамповывают несколько пазов прямоугольной формы (рис. 124, *в*) или в виде «ласточкина хвоста». После прессования сердечника, не снимая давления, устанавливают скобы *7* и загибают их края на торец сердечника. Скоба не должна выступать над сердечником. В некоторых случаях скобы крепят к сердечнику сваркой. После крепления скоб сердечник снимают с оправки.

Скрепление склеиванием. Склеивание — наиболее трудоемкий процесс скрепления сердечников, поэтому его используют, когда другими способами нельзя получить качественного соединения. Перед сборкой на оправку листы покрывают клеящими лаками БФ-4 или ВС-350 и др. Перед покрытием листы обезжиривают. Покрытие (толщиной 7—12 мкм) производят, пропуская каждый лист через два резиновых валка, смачиваемых лаком. После этого выполняют в течение 1 ч сушку на воздухе и покрывают второй раз. Затем листы собирают на оправку, прессуют, закрепляют на ней и помещают в печь для запечки. После запечки сердечник снимают с оправки и зачищают от наплывов лака все поверхности, особенно тщательно в пазах.

Скрепление листов ротора и получение сердечника производят: заливкой алюминия; развальцовкой втулки; напрессованием на вал либо на другой конструктивный элемент.

Скрепление заливкой алюминия. Заливкой алюминия скрепляют листы короткозамкнутых роторов. Для заливки собранные на оправке листы устанавливают в литейную машину и под давлением заливают алюминий. Подробно процесс описан в § 74.

Скрепление на втулке развальцовкой. Подобранные на втулку листы помещают под пресс и развальцовывают края втулки (см. рис. 76). Собранные таким образом сердечники напрессовывают на вал либо заливают пластмассой или алюминием.

Скрепление напрессованием на вал. Листы небольшого диаметра и толщиной 0,5 мм, имеющие пазы для укладки обмотки, в некоторых случаях набирают непосредственно на вал (см. рис. 79 и 53). В месте расположения листов на валу производят накатку рифлей, на которые напрессовывают листы, удерживаемые силой

трения. При необходимости листы дополнительно удерживаются втулками (см. рис. 92).

Скрепление на конструктивных элементах. В некоторых конструкциях листы набирают на магниты *6* (см. рис. 40), втулки (см. рис. 69) и другие элементы. Скрепление производят втулками, которые запирают сердечник и удерживают его от продольных и радиальных перемещений.

§ 56. Механизация сборки сердечников статора и ротора

При изготовлении микромашин в массовом производстве широко используют полуавтоматические и автоматические установки сборки и скрепления сердечников. В этих установках совмещены операции дозирования, ориентирования и скрепления сердечников.

Рассмотрим принцип действия установки ВСС-5 (рис. 125) для сборки сердечников малых машин (на рисунке показаны рабочие органы установки). Стопа листов *5* электротехнической стали, отштампованной на прессе-автомате, имеющая ориентированные листы, помещается оператором в кассету *6*. Кассета опускается, захваты *4* освобождают листы, и они опускаются на штыри *2*. Затем кассета поднимается над плитой *1* на расстояние, равное высоте сердечника, захваты отсекают дозу *3* листов и кассета поднимается выше. Таким образом на штырях *2* располагается предварительно взятая доза листов. По пазам, имеющимся в плите *1*, штыри *2* передвигаются вправо на вторую позицию для точного дозирования сердечника. Для точного ориентирования оправка *9* опускается вниз, входит в сердечник и разжимается, а накладка *10* спрессовывает сердечник при заданном давлении. После этого захваты *8* отсекают точную дозу листов. Затем давление снимают и доза листов поднимается вверх, а оставшиеся на штырях листы вместе со штырями двигаются влево под кассету.

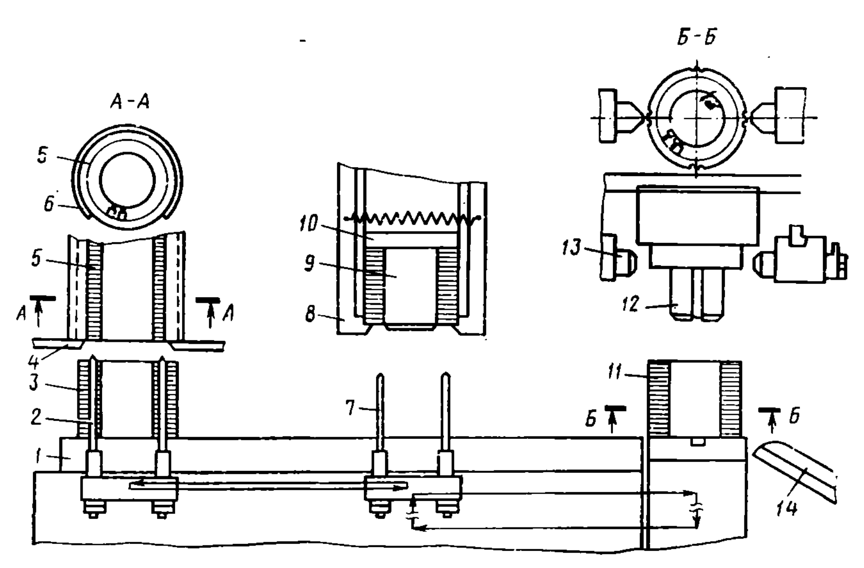


Рис. 125. Схема рабочих органов установки ВСС-5 для автоматической сборки сердечников статора или ротора:

1 — плита, *2, 7* — штыри, *3* — доза листов, *4, 8* — захваты, *5* — стопа листов, *6* — кассета, *9, 12* — оправки, *10* — накладка, *11* — сердечник, *13* — сварочные головки, *14* — лоток

На позицию точного дозирования подходят штыри *7*, на которые опускается точная доза листов сердечника. Штыри передвигаются вправо (движение штырей показано на рисунке стрелками), доставляя дозу листов сердечника на позицию сварки, и опускаются вниз, освобождая ее. Сверху в дозу сердечника входит разжимная оправка *12*, ориентирует листы по внутреннему диаметру, а две шпонки, расположенные на ней, входят в два шлица паза и ориентируют листы в радиальном направлении. Листы прессуют при заданном давлении, а четыре сварочные головки *13* одновременно производят сварку всех швов. После сварки сердечник *11* подается на лоток *14*.

Сварка осуществляется неплавящимся вольфрамовым электродом. Сварной шов образуется расплавлением свариваемого металла.

Стремление технологов совместить несколько операций в одном оборудовании привело к созданию линий (рис. 126), на которых выполняют штамповку, сборку и скрепление сердечников.

На линии осуществляют операции штамповки, дозировки, ориентации и скрепления сердечников статора. Электротехническую сталь в рулонах устанавливают в разматывающее устройство *8*. Из разматывающего устройства лента *7* проходит семивалковое правильное устройство *6* (два валка тянущих) и, образуя петлю,

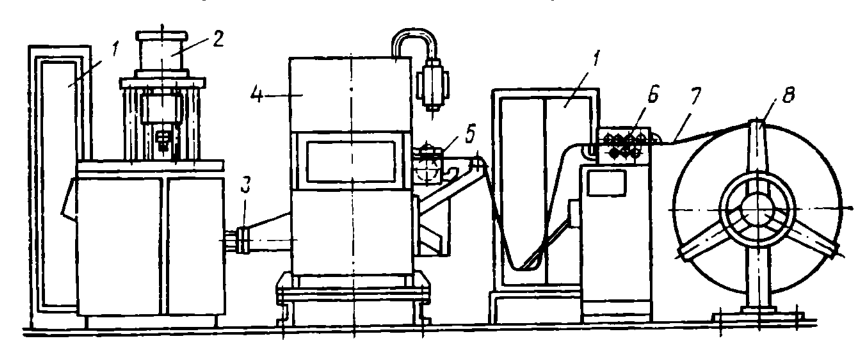


Рис. 126. Автоматическая линия штамповки, сборки и скрепления сердечников:

1 — шкафы, *2* — автоматическое устройство, *3* — оправка, *4* — пресс-автомат, *5* — подающее устройство, *6* — правильное устройство, *7* — лента, *8* — разматывающее устройство

передается подающим устройством *5* в пресс-автомат *4*, который представляет собой двухэксцентриковую бесшатунную машину с плавным регулированием количества ходов (от 50 до 600 в минуту). Штамповка осуществляется четырехпозиционным штампом.

Стапелирующие оправки *3*, отводящие листы статора, шарнирно связаны с автоматическим устройством *2* дозирования и скрепления. В дозирующем устройстве происходят отбор предварительной дозы листов с избытком в несколько листов, точное дозирование, ориентирование и скрепление четырьмя сварными швами. В линии отсутствует ручная передача листов из пресса на сборку сердечника. Управление автоматической линией расположено в шкафах *1*. Производительность линии 700 000 сердечников в год.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под определением паз в штампе и паз в свету?
2. Какие операции входят в подготовку листов к сборке?
3. Расскажите о порядке сборки листов статора и ротора на оправку.
4. Какие способы скрепления листов статора вы знаете?
5. Какие способы скрепления листов ротора вы знаете?

ГЛАВА XIV. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

§ 57. Механическая обработка деталей электрических машин общего назначения

Задача механической обработки — получение деталей требуемой чертежом конфигурации, степени точности и чистоты поверхности, которые обеспечили бы сборку машины и ее надежную работу при эксплуатации. При конструировании машины и разработке технологии ее изготовления конструктор и технолог, учитывая назначение каждой детали, устанавливают точность ее обработки и шероховатость поверхностей. При определении точности недопустимо занижать или завышать ее, так как в первом случае электрическая машина получается неработоспособной и ненадежной, а во втором — резко усложняется ее производство и, следовательно, увеличивается себестоимость.

Механическую обработку цилиндрических деталей машин общего назначения производят с точностью по 5—6-му квалитету, их линейные размеры получают при обработке по 8—10-му квалитету.

При выполнении заготовки на ней оставляют слой металла — припуск, который удаляют в процессе обработки. На заготовке должны быть заданы технологические базы — поверхности, которые используют для определения положения заготовки при ее обработке.

Электрические микромашины общего назначения, как правило, изготовляют в больших количествах, и технологический процесс

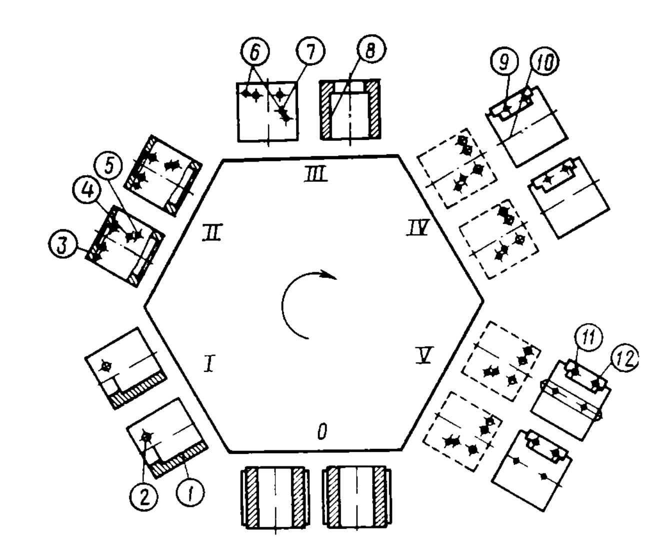


Рис. 127. Шестипозиционный агрегатный станок с автоматической установкой и снятием корпусов при механической обработке:
I—VI — позиции

строят по типу массового производства. Для механической обработки деталей используют агрегатные и автоматические станки. Агрегатные станки имеют позицию для установки и снятия деталей и несколько рабочих позиций для их одновременной обработки. Уровень автоматизации обработки на этих станках такой же, как и на автоматических линиях.

Обработка корпусов на агрегатных станках. Корпуса электродвигателей малой мощности отливают из алюминия. На рис. 127 показан шестипозиционный агрегатный станок с автоматической установкой и снятием деталей для обработки корпусов электродвигателей с высотой оси вращения 50—63 мм. Последовательность выполнения операций на станке следующая (операции на рисунке даны в кружках): на нулевой позиции устанавливают два корпуса, на *I* — сверлят два отверстия *2* для выводных концов и растачивают внутренний диаметр *1*, на *II* — сверлят отверстие *4* под резьбу для крепления коробки зажимов и отверстие *5* под резьбу для ее заземления, подрезают наружные и внутренние торцы *3*, растачивают фаски, на *III* — нарезают резьбу в отверстиях *6* и *7* и производят чистовое растачивание поверхности *8* под сердечник с обмоткой, на *IV* — сверлят два отверстия *9* под винты заземления и два отверстия *10* под заклепки крепления таблички, на *V* — нарезают резьбу в отверстиях *11* и *12* под винты заземления.

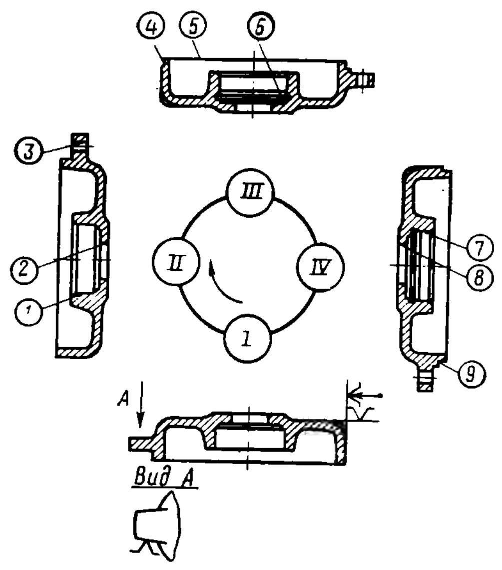


Рис. 128. Четырехпозиционный агрегатный станок для обработки подшипниковых щитов

При обработке корпуса внутренние и наружные торцы обрабатывают с припуском. Окончательную обработку торцов и плоскости лап, а также сверление отверстий в лапах выполняют на сборочном конвейере при сборке статора.

Обработка подшипниковых щитов. Механическую обработку щитов можно производить на многопозиционном агрегатном станке. Четырехпозиционный агрегатный станок показан на рис. 128 (операции на рисунке даны в кружках). Подшипниковые щиты устанавливают вручную и крепят с помощью пневматического устройства. На *I* позиции устанавливают щит, на *II*— производят черновую расточку отверстия под подшипник *1* и вал *2* и сверление отверстий в ушках *3*, на *III* — выполняют черновую проточку замка *4*, подрезку торца *5*, расточку канавки в отверстии под подшипник *6*, на *IV* — осуществляют чистовую расточку отверстий под подшипник 7 и вал *8*, чистовую проточку замка *9*.

Обработка валов. В крупносерийном и массовом производстве валы обрабатывают на полуавтоматических и автоматических станках. Заготовки валов получают разрезкой дисковыми пилами круглого сортового проката или его поперечно-клиновой прокаткой на специальных станках.

При обработке заготовки из круглого проката для получения ступенчатых валов необходима токарная обработка, при этом использование металла — низкое. При обработке заготовки, полученной поперечно-клиновой прокаткой, токарная обработка не требуется или она минимальна, так как заготовка по форме и размерам близка к готовой детали. Обработку производят грубым, а затем чистым шлифованием. При изготовлении гладких валов обработку выполняют на бесцентровых шлифовальных станках и отходы минимальные. При этом, используя специальные доводочные операции, можно обеспечить чистоту поверхности 0,16 мкм.

При обработке валов на автоматическом оборудовании применяют две схемы базирования: на центровых отверстиях или по наружному диаметру заготовки (бесцентровая схема). Первую

схему используют при наличии токарной обработки, а вторую — при обработке профильной заготовки. Профильная заготовка, имея малый припуск по наружному диаметру, позволяет исключить токарную обработку, а обработку начинать с грубого шлифования.

§ 58. Механическая обработка деталей электрических машин автоматических устройств

Механическая обработка деталей электрических машин автоматических устройств имеет ряд особенностей, вызванных тем, что основными показателями машин являются точность работы, быстродействие, стабильность характеристик. Как правило, обработку цилиндрических деталей производят с точностью по 4—5-му квалитету, а линейных размеров — по 7—8-му квалитету, т. е. на 1—2 квалитета выше, чем при обработке деталей машин общего назначения. Требования к шероховатости поверхностей также выше. Другая особенность машин автоматических устройств — небольшие размеры их деталей, что требует дополнительных мер для получения необходимой точности и шероховатости поверхностей.

Точность и шероховатость поверхностей — важнейшие показатели, обеспечивающие необходимые натяги при посадке на вал подшипников, сердечников и других деталей. Несущая способность посадки с натягом пропорциональна кубу диаметра. Например, при уменьшении диаметра на $^1/_5$ несущая способность посадки уменьшается почти в 2 раза.

Заготовки для многих деталей наиболее экономично получать отрезкой круглого проката, литьем цветных металлов, штамповкой листового материала. Номенклатура используемых материалов намного шире, чем при изготовлении машин общего назначения. Это вызвано тем, что характеристики машин автоматических устройств намного разнообразнее, чем машин общего назначения.

При изготовлении конструкционных деталей применяют стали: углеродистые, например марок У7, У8, 35, 40, 50, малолегированные 40Х, 38ХА, 30ХГСА, шарикоподшипниковую ШХ-45, нержавеющие 20Х13, 30Х13, 40Х13, 14Х17Н2, 95Х18, переходного класса 07Х16Н6 и др.

Детали из углеродистых сталей изготовляют в таком порядке: сначала выполняют предварительную обработку, затем термическую и окончательную обработку на последних операциях шлифованием. Для стали У7, У8 режим термообработки следующий: выдержка при 790—810°С в течение 15 мин, охлаждение в масле и отпуск при 300—350°С в течение 30—40 мин, при этом получают твердость HRC 48...54.

Для термообработки лучше применять высокочастотную закалку поверхностного слоя на глубину до 2 мм. Вал после высокочастотной закалки по сравнению с валом, имеющим сквозную про-

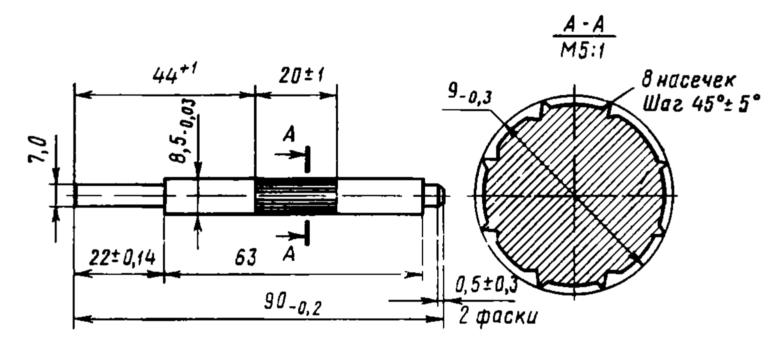


Рис. 129. Вал для крепления на нем сердечника прессовкой пластмассы

калку, имеет твердую поверхность и вязкую сердцевину, вследствие чего он менее хрупок.

Нержавеющие стали вязкие, поэтому при их обработке трудно получить точные поверхности с малой шероховатостью. Стали перед обработкой закаливают при 1050—1075°С и отпускают при 650°С в течение 1,5 ч, при этом получают твердость HRC 20...25.

На рис. 129 показан изготовленный из нержавеющей стали

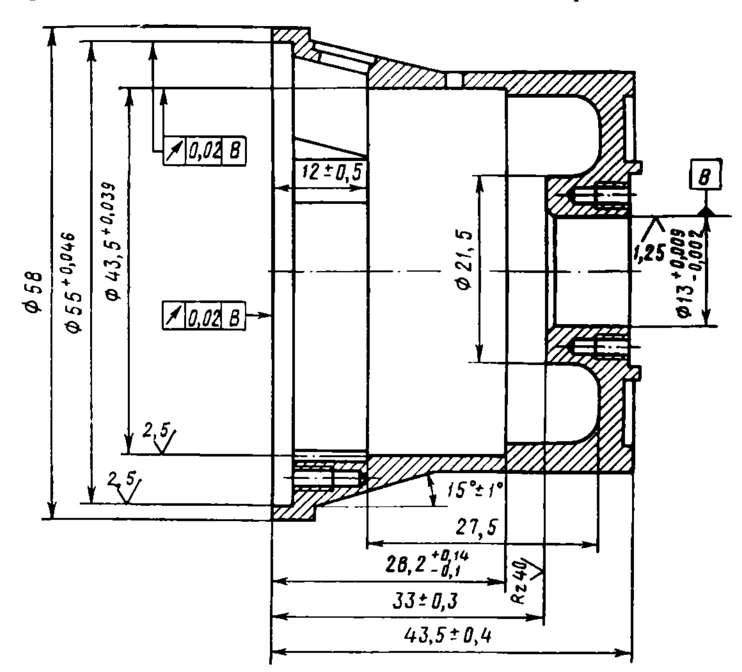


Рис. 130. Корпус, совмещенный с подшипниковым щитом

вал, на который будет крепиться сердечник прессовкой пластмассы. В середине вала сделаны насечки, чтобы обеспечить хорошее сцепление его с пластмассой. Цилиндрические поверхности вала обработаны с невысокой точностью потому, что их окончательная обработка будет осуществляться после соединения вала с сердечником. При этом получится высокая концентричность наружной поверхности сердечника и мест для посадки подшипников.

На рис. 130 показан корпус, совмещенный с подшипниковым щитом (см. рис. 73). Отверстия в корпусе под подшипник и сердечник обработаны без припусков. Посадочные места имеют небольшую шероховатость поверхностей.

Для правильной сборки электродвигателя и его надежной работы требуется максимальная соосность: внутренней поверхности сердечника и замков на корпусе в статоре, мест посадок подшипников на валу и наружной поверхности сердечника в роторе, поверхностей для установки подшипника и замка для сочленения с корпусом в подшипниковом щите. Для статора и ротора практически невозможно получить необходимые соосности механической обработкой деталей и последующей их сборкой, поэтому после сборки производят чистовую механическую обработку на сборочных участках (обработка рассматривается в последующих параграфах).

Контрольные вопросы

1. Что входит в задачу механической обработки?
2. Когда обработку выполняют на агрегатных станках?
3. Что такое припуск на заготовке?
4. Какие существуют особенности при механической обработке деталей для электрических машин автоматических устройств?

ГЛАВА XV. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ

§ 59. Общие сведения

Коллектор — наиболее сложный и ответственный узел электрической машины, что объясняется, во-первых, конструкцией кольца, состоящего из большого количества медных пластин, чередующихся с изоляционными прокладками, во-вторых, сложными геометрическими формами сопряжения металлических и изоляционных деталей и, наконец, силовыми явлениями, возникающими под действием центробежных сил и температурных изменений. Для обеспечения хорошей коммутации биение коллектора в готовой машине должно быть не более 0,02—0,03 мм. Если учесть, что половина этого значения обусловливается зазором подшипников, эксцентриситетом подшипниковых щитов, то на долю допустимого биения

коллектора остается 0,001—0,015 мм. Коллектор должен иметь монолитную конструкцию и сохранять геометрическую форму в течение всей эксплуатации.

По конструкции и технологии изготовления различают коллекторы на стальной втулке и на пластмассе. Коллекторы на стальной втулке используют в машинах средней и большой мощности, поэтому здесь не рассматриваются. Практически все коллекторы машин малой мощности изготовляют на пластмассе. По способу образования кольца коллекторных пластин эти коллекторы разделяют на две группы: коллекторы с кольцом из отдельных пластин и коллекторы, пластины которых получены разделением цельной заготовки. Коллекторы первой группы изготовляют давно, а второй группы все чаще применяют в последнее время, хотя и ограниченно из-за их небольшого диаметра (до 50 мм).

Коллекторы могут надеваться на вал непосредственно пластмассовым корпусом (см. рис. 51, *а*) или иметь стальную втулку (см. рис. 51, *б*) для более надежного крепления. В некоторых коллекторах предусматривают армировочные кольца (см. рис. 51, *б*) для повышения их прочности.

§ 60. Технология изготовления коллекторов с кольцом из отдельных пластин

Технологические схемы изготовления коллекторов с кольцом, набираемым из отдельных пластин, разнообразны. Из всех технологических операций наиболее трудоемкой является сборка контактных и изоляционных пластин в кольцо, составляющая более 30 % от общей трудоемкости. Рассмотрим два наиболее механизированных технологических процесса.

Технологическая последовательность операций первого процесса показана на рис. 131. Процесс состоит из восьми основных операций:

I операция — штамповка контактных и изоляционных прокладок, выполняемая штампами на кривошипных прессах. Контактные пластины штампуют из холоднотянутой меди М1 трапецеидального профиля, поставляемой в виде полос. Размеры профиля (высота H, наибольшая ширина a и угол α, рис. 132) определяются ГОСТом. При штамповке пластины необходимо располагать на заготовке определенным образом (рис. 133, *а*), что приводит к большому отходу материала (30—50 %). Более экономичный способ получения пластин — прессование их из медного порошка. После штамповки пластины подвергают галтовке для снятия заусенцев и притупления острых краев, а затем обезжиривают. Изоляционные прокладки штампуют из прокладочного миканита или слюдинита толщиной 0,3—0,7 мм (материалы выполнены на основе слюды с малым содержанием связующих — до 4 %). Изоляция является дорогим материалом, поэтому его следует раскраивать экономично (рис. 133, *б*);

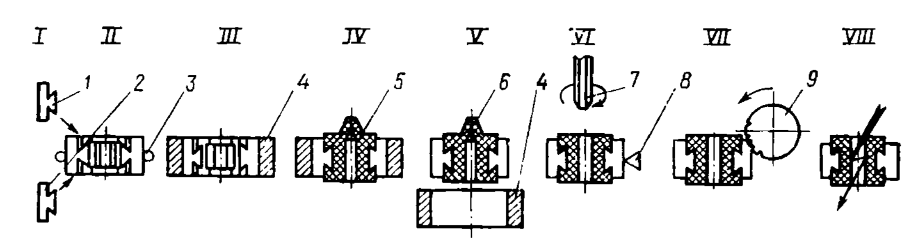


Рис. 131. Последовательность операций при изготовлении коллектора из отдельных коллекторных и изоляционных пластин:

1, 2 — контактные и изоляционные пластины, *3* — проволока, *4* — сборочное кольцо, *5* — пресс-материал, *6* — литник, *7* — развертка, *8* — резец, *9* — фреза

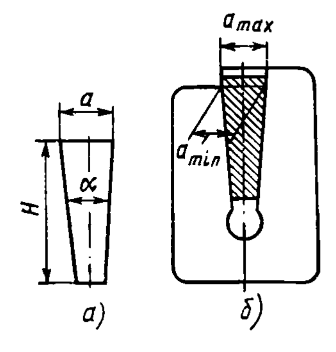


Рис. 132. Профиль коллекторной меди (*а*) и шаблон для проверки профиля (*б*)

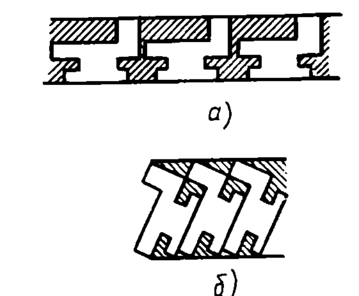


Рис. 133. Схемы раскроя материала при штамповке коллекторных пластин (*а*) и изоляционных прокладок (*б*)

II операция — сборка пластин в кольцо. Заданное чертежом количество контактных *1* (см. рис. 131) и изоляционных *2* пластин собирают в кольцо так, чтобы между контактными располагались изоляционные пластины. После сборки их обвязывают проволокой *3*;

III операция — напрессование на кольцо коллекторных пластин сборочного кольца, осуществляемое на прессе. При этом происходит плотное прилегание пластин между собой, их выравнивание и точное ориентирование;

IV операция — опрессование пластмассой. Подогревают кольцо коллекторных пластин и ставят в пресс-форму. Затем устанавливают пресс-материал *5* в виде таблеток и производят прессование (обычно пресс-формы многоместные и прессуют сразу несколько коллекторов) термореактивными пластмассами при высокой температуре. Изоляционные пластины спекаются и после удаления

связующего принимают окончательные размеры (см. § 47). После прессования производят термообработку для снятия возникших в пластмассе внутренних напряжений;

V операция — выпрессовывание сборочного кольца *4* и удаление литника *6*. Эту операцию производят на прессе;

VI операция — обработка посадочного отверстия сверлом или разверткой *7* и предварительная проточка наружной поверхиости пластин резцом *8*. Окончательную обработку поверхности выполняют после сборки коллектора с валом;

VII операция — фрезерование шлицев в контактных пластинах фрезой *9* для установки в них выводов обмотки;

VIII операция — испытание на электрическую прочность. Для этого последовательно к каждой паре контактных пластин, расположенных рядом, прикладывают высокое напряжение. Изоляция должна выдержать это напряжение.

Если в коллекторе предусмотрена стальная втулка для крепления его на валу, ее ставят в пресс-форму до установки кольца и производят прессование. При испытаниях проверяют прочность изоляции между втулкой и каждой контактной пластиной, а также между каждой парой контактных пластин. Коллектор проверяют также на динамическую прочность. Нагретый коллектор вращают в специальной установке с частотой, равной 1,5—1,8 номинальной, при этом пластины не должны выступать из него.

Технологическая последовательность операций второго процесса показана на рис. 134. Во втором процессе изоляцию между контактными пластинами выполняют не отдельными изоляционными прокладками, а пластмассой, которую прессуют в пространство между пластинами. Процесс состоит из десяти основных операций:

I операция — штамповка контактных пластин *1* осуществляется так же, как и в первом процессе;

II операция — сборка контактных пластин *1* в сборочную оправку *2*. Пластины вставляют узкой частью в сборочную оправку, при этом входит в нее только их часть. Между широкими частями пластин имеются воздушные промежутки, в которые на последующих операциях прессуют пластмассу;

III операция — напрессование на кольцо коллекторных пластин сборочного кольца *3;*

IV операция — опрессование пластмассой в промежутки между широкими частями пластин. Сначала подогревают контактные пластины и помещают их в пресс-форму, затем устанавливают пресс-материал и производят прессование. Пресс-форма имеет такую конструкцию, которая обеспечивает попадание пластмассы *4* только в пространство между контактными пластинами;

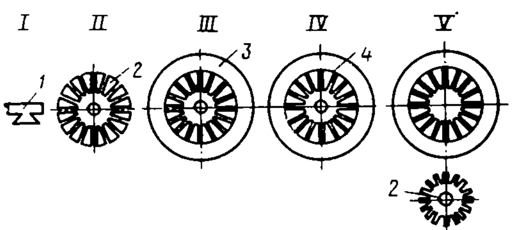


Рис. 134. Последовательность операций при изготовлении коллектора из коллекторных пластин и пластмассовой межламельной изоляции

V операция — выпрессовывание сборочной оправки из пакета контактных пластин, которые ие рассыпаются, а держатся залитой пластмассой и сборочным кольцом *3*.

Дальнейшие операции аналогичны операциям первого процесса, начиная с IV.

§ 61. Технология изготовления коллекторов разделением цельной заготовки

Коллекторы разделением цельной заготовки выполняют диаметром до 50 мм. При изготовлении коллекторов разделением цельную заготовку получают гибкой медной полосы в кольцо, затем на нем делают выступы для крепления с пластмассой (в некоторых конструкциях и с обмоткой), опрессовывают пластмассой и разделяют его на пластины. Из многих вариантов процесса рассмотрим один, последовательность операций которого показана на рис. 135. Процесс состоит из шести основных операций:

I операция — отрезка медной полосы *1* и гибка ее в кольцо. После гибки производят калибровку для получения точного размера кольца;

II операция — прошивка. Кольцо устанавливают в приспособление и прошивкой за один ход пресса прошивают пазы *3*. Место стыка *2* кольца должно находиться на середине одного из пазов;

III операция — подсечка и отгибка опорных выступов для крепления пластмассой. Заготовку загружают в штамп и пуансоном подрезают, а затем отгибают выступы. При первом ходе пресса получают выступы *5*, которые располагаются ближе к центру кольца, а при втором ходе — выступы *4*;

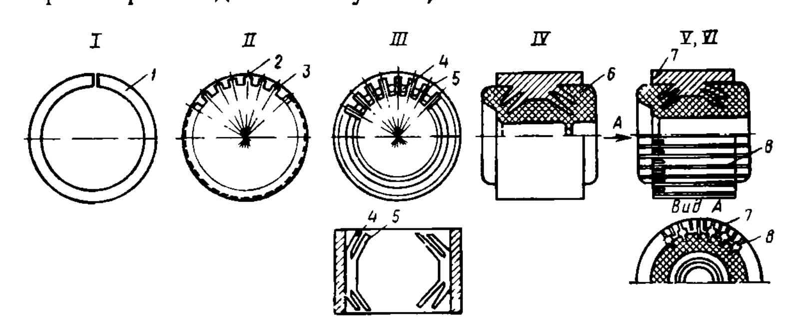


Рис. 135. Последовательность операцнй при изготовлении коллектора из иеразделенной заготовки гнбкой полосы:

1 — медная полоса, *2* — кольца, *3*, *8* — пазы, *4*, *5* — выступы, *6* — пластмасса, *7* — шлнцы

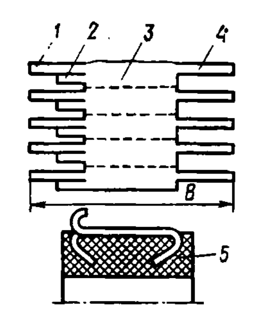


Рис. 136. Последовательность операций при изготовлении коллектора из неразделеной заготовки штамповкой полосы

IV операция — опрессовка пластмассой *6*. Перед опрессовкой заготовку обезжиривают в растворе (технический едкий натр, технический тринатрий фосфат и вещество ОП-7) при 60—70°С в течение 5—10 мин, помещают в пресс-форму, устанавливают таблетку пресс-материала и производят опрессование. После этого выполняют термообработку;

V операция — обработка внутреннего отверстия и разделение пластин. Отверстие обрабатывают твердосплавной разверткой. Для разделения пластин заготовку помещают в приспособление, ориентируют и прошивают наружной прошивкой пазы *8* по наружному диаметру. Ориентируют заготовку так, чтобы внутренние и наружные пазы перекрыли друг друга, произошло разделение заготовки и образование коллекторных пластин;

VI операция — фрезерование шлицев *7* в контактных пластинах для установки в них выводов обмотки.

Коллектор, показанный на рис. 51, *в*, также выполнен из неразделенной заготовки. Изготовляют его таким образом. Медную полосу шириной *В* штампуют по форме, показанной на рис. 136. Выступы *1* и *4* полости предназначены для закрепления пластмассой, а выступ *2* — для соединения с обмоткой. Прямолинейная часть контактной пластины будет образована поверхностью *3*. После штамповки полосу изгибают в кольцо по диаметру коллектора, выступы *1* и *4* выгибают внутрь кольца, а выступ *2* — снаружи его и опрессовывают пластмассой *5*. Разделение полосы на пластины производят фрезерованием в местах, показанных на рисунке пунктиром.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит сложность изготовлення коллектора?
2. Какова последовательность операций при изготовлеиии коллекторов с кольцом нз отдельных пластин?
3. Какова последовательность операцнй при изготовлеиии коллекторов нз цельной заготовки?
4. Какие конструктивные исполнения коллекторов вы знаете?

ГЛАВА XVI. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И УКЛАДКА ОБМОТОК СТАТОРОВ

§ 62. Изготовление и уклвдкв обмоток статоров с распределенными пазами ручным способом

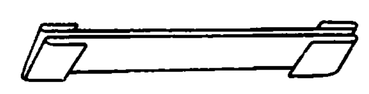
Укладка обмотки вручную — наиболее старый способ. По мере совершенствования технологии укладки обмоток и их конструкции разрабатывались способы механизации. В настоящее время механизированным способом изготовляют однослойные концентрические обмотки и двухслойные обмотки специальной конструкции, которые используют только в машинах средней мощности. Двухслойные равнокатушечные обмотки (см. рис. 15), применяемые в машинах малой мощности для получения необходимых характеристик, укладывают ручным способом, так как пока отсутствует механизированный.

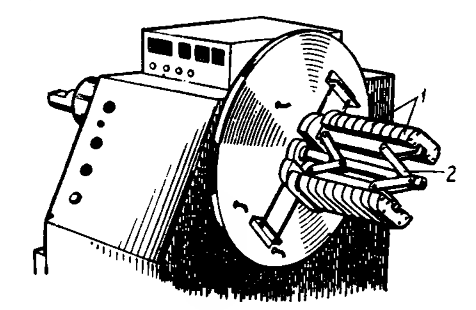
Рассмотрим укладку двухслойной обмотки (см. рис. 15). Она состоит из следующих операций: изоляции пазов; намотки катушек; укладки катушек; сборки и пайки схемы и выводных концов; увязки и формовки лобовых частей.

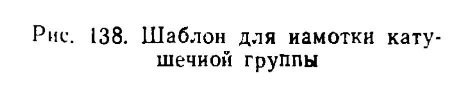
Перед укладкой обмотки изолируют паз, а в некоторых машинах и торец сердечника; во время укладки изоляцию устанавливают в пазу между слоями (в двухслойной обмотке) и между проводами разных фаз в лобовых частях обмотки. Пазы изолируют полосками изоляционного материала (его подгибают на краях, образуя манжеты) и, сгибая вдоль, устанавливают в паз (рис. 137). Торцы сердечника изолируют электрокартоном. На штампах, которыми вырубались листы статора из электротехнической стали, вырубают листы из электрокартона и приклеивают их к торцам сердечника.

Намотку катушек производят на шаблон (рис. 138), имеющий две щеки *1*, на которых выполнено несколько ручьев для провода. В каждый ручей наматывается одна катушка.

Провод, как правило, применяют тонкий (менее 0,8 мм). Наматывают без перерыва провода одну катушечную группу или несколько катушечных групп, образующих одну фазу. Станки осна-


Рис. 137. Пазовая изоляция




Рис. 138. Шаблон для иамотки катушечиой группы

щены автоматикой, которая после намотки одной катушки, переводит провод в другой ручей шаблона для намотки следующей катушки, обеспечивает намотку каждой катушки с точностью до одного витка и останавлнвает станок после намотки заданного количества катушек. По окончании намотки каждую катушку перевязывают шнуром во избежание перепутывания ее витков и катушки снимают. Для этого шарниры *2* сближают щеки *1* шаблона. Перевязка каждой катушки — трудоемкая операция. Процесс перевязки можно ускорить, скрепляя лентами, которые склеиваются под действием высокой температуры. На щеке имеется продольный паз глубиной до дна ручья, в который до намотки укладывают ленту. После намотки катушек поверх их укладывают вторую такую же ленту, подводят горячий паяльник с несколькими жалами, каждое из которых прижимает в промежутках между катушками верхнюю ленту к нижней и оплавляет их, в результате чего они склеиваются.

Намотку катушки производят с натяжением провода для получения ее формы, близкой к форме шаблона. При слабом натяжении провода форма катушки не получается, при сильном натяжении провод вытягнвается, что ослабляет его изоляцию и может привести к повреждению провода. Поэтому во время намотки обмотчик особенно внимательно должен следить за натяжением провода и при необходимости регулировать его.

Следующая операция — укладка катушек. Перед укладкой во избежание повреждения изоляции провода в шлиц паза устанавливают две технологические прокладки толщиной 0,1—0,2 мм. Проводники укладывают в паз, всыпая их через его шлиц. Укладку следует производить тщательно, так как внутренний диаметр сердечника статора очень мал, его длина несколько десятков миллиметров, а провод тонкий. Для лучшего попадания витков в пазы используют проводку, которой проталкивают проволоки. При двухслойной обмотке после заведения в паз первого слоя устанавливают прокладку *4* между слоями (см. рис. 10) и заводят второй верхний слой. Сверху устанавливают клин *3*, который удерживает витки от выпадения из паза. В лобовых частях обмотки изоляционные прокладки располагают между разными фазами.

При двухслойной обмотке последовательность заведения катушек в пазы рассмотрим на примере обмотки, показанной на рис. 15. Первую катушку одной стороной устанавливают в низ восьмого паза, а другой стороной необходимо установить в верх первого паза, но в нем еще отсутствует нижняя сторона катушкн, поэтому сторону катушки оставляют неуложенной около паза. Так же поступают с катушками, начиная со второй и кончая седьмой. Восьмую катушку можно уложить одной стороной в низ пятнадцатого паза, а второй стороной — в верх восьмого паза, так как в его низу уже имеется одна сторона первой катушки. Уложив остальные катушки в верх и низ пазов, укладывают верхние стороны первых восьми катушек, начиная с седьмой.

После укладкн катушек к концам фаз присоедняют выводные провода машины в соответствии с конструкторским чертежом и припаивают их. Затем связывают лобовые части катушки тонким шнуром или толстыми нитками. Из проволоки делают иголку, продевают в нее шнур и, заводя иглу около сердечника вдоль зубца, выполняют стежки. Обвязывают лобовые части, проводя иглу около каждого зубца.

Формовку лобовых частей катушек производят легкими ударами подбойки, придавая им окончательную форму, обмотанный статор затем отправляют на контроль, испытания и пропитку.

§ 63. Укладка обмоток статоров с распредепенными пазами способом втягивания

Способ втягивания, или раздельный способ укладки обмотки, по сравнению с другими является более производительным. Его применяют для укладки концентрических обмоток проводом диаметром от 0,2 до 1,6 мм.

При изготовлении обмоток способом втягивания выполняют следующие операции: изолирование пазов; намотку катушечных групп; перенос катушечных групп на втягивающую оправку; установку сердечника и втягивание обмотки с одновременным заклиниванием пазов; разжим лобовых частей; изолирование лобовых частей; сборку и пайку схемы и выводных концов; бандажирование и формование (калибрование) лобовых частей. Для осуществления этих операций используют набор станков: пазоизолировочный, намоточный, втягивания и заклинивания, разжимный и бандажировочный. Операции сборки схемы и пайки производят вручную. Рассмотрим каждую операцию.

Изолирование пазов выполняют на пазоизолировочных станках. Последовательность выполнения операций изолирования пазов показана на рис. 139. Изоляционный материал в виде рулона *1* (рис. 139, *а*) механизмом прерывистого действия *3* протягивается через профильные направляющие *2*, в которых отбортовываются манжеты. В момент прекращения подачи ленты нож *4* отрезает заготовку *7* требуемой длины, которая устанавливается на матрицу *6* (рис. 139, *б*) гибочного штампа. Пуансон *5* (рис. 139, *в*) опускается вниз и формует пазовую коробочку *8*, которая толкателем *9* из матрицы *6* через направляющие *10* подается в пазы сердечника *11* (рис. 139, *г*). Процесс подачи приведен на рнс. 139, *д*, на котором для наглядности не показана матрица. После изолирования сердечник индексирующим (поворотным) механизмом поворачивается на одно пазовое деление и очередной не изолированный паз оказывается на одной оси с направляющей. Цикл изготовления пазовой коробочки и ее установка в сердечник повторяются. После

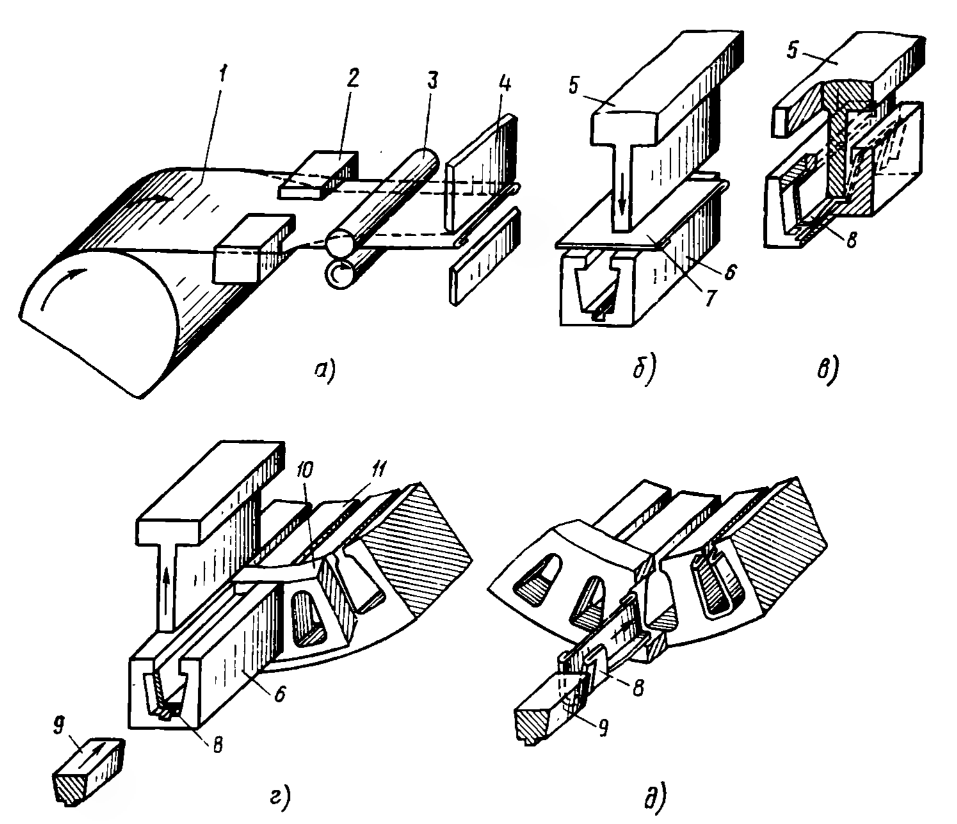


Рис. 139. Последовательность выполнения операций изолирования пазов:
а — формовка и отрезка заготовки, *б* — установка заготовки на матрице, *в* — формование пазовой коробочки, *г, д* — подача пазового короба в сердечник; *1* — рулон, *2, 10* — направляющие, *3* — механизм подачи прерывистого действия, *4* — нож, *5* — пуансон, *6* — матрицы, *7* — заготовка, *8* — коробочка, *9* — толкатель, *11* — сердечник

изолирования всех пазов станок останавливается и оператор меняет сердечник.

Рассмотрим работу пазоизолировочного станка ИС-23А (рис. 140). Оператор устанавливает на стол *5* сердечник и, досылая его вперед, надевает на оправку *4*. На наружной поверхности оправки имеется направляющий выступ, который входит в шлиц одного из пазов, ориентируя сердечник. Затем оператор, поворачивая ручки, заводит на торец сердечника прижимы *3*, которые удерживают сердечник при работе станка. Рулон изоляционного материала *2* надевают на барабан *1* и заправляют в станок. При нажатии кнопки «Пуск» происходит изолирование пазов. В современных станках скорость изолирования достигает 150 пазов в минуту.

Остановка станка происходит автоматически после изолирования всех пазов. Оператор снимает сердечник со станка и контро-

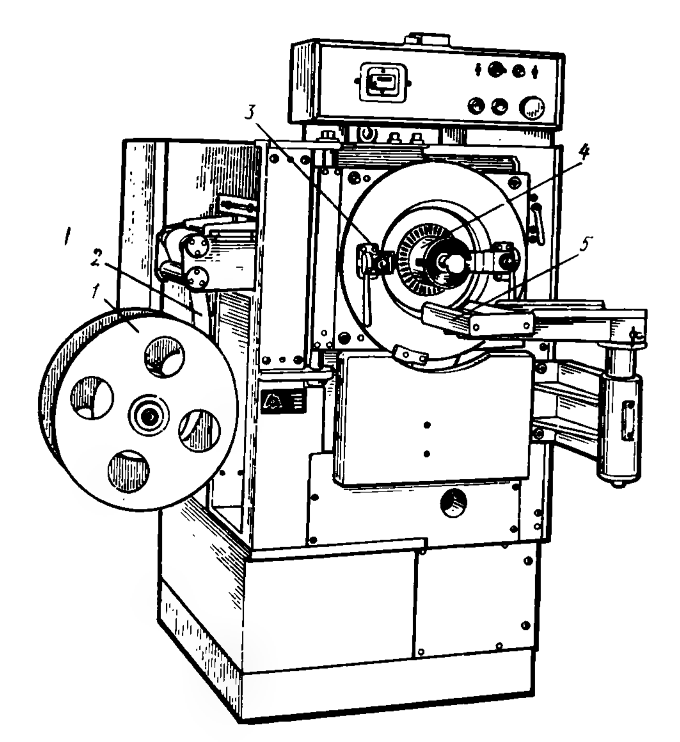


Рис. 140. Пазоизолировочный станок ИС-23А

лирует качество изолирования. Пазовая коробочка должна плотно облегать паз. Ее кромки должны касаться поверхности паза по всей длине сердечника и не выходить в шлиц паза или устанавливаться против него. Края манжет не должны заходить в паз. Изоляция должна быть без повреждений, вызванных воздействием рабочих органов станка. Периодически проверяют размеры коробочки и ее развертки.

Современные станки, используемые в массовом производстве, снабжены специальными манипуляторами (роботами) для установки и снятия сердечников, которые позволяют механизировать весь процесс изолирования. Изолированный сердечник передают на операции втягивания.

Намотку катушечных групп выполняют на намоточных станках в автоматическом цикле. Намоточный станок (рис. 141) имеет несколько шаблонов *7* (на рисунке показано три шаблона), на каждый из которых наматывается одна катушечная группа из нескольких катушек (на рисунке катушечная группа имеет две катушки). Операцию намотки производят в таком порядке. Оператор устанавливает бухту с намоточным проводом *1* на подставку, накрывает ее баллоногасителем *2*, заправляет провод в станок че-

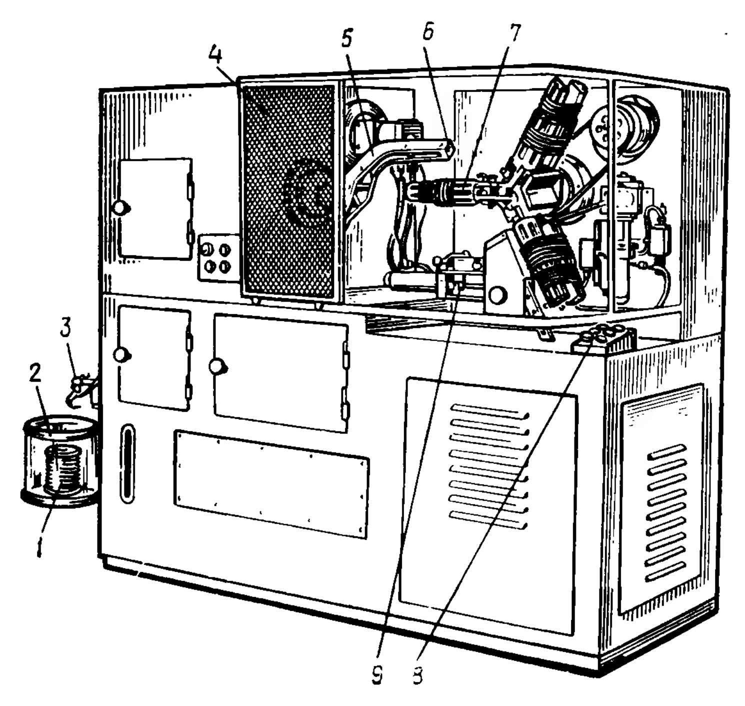


Рис. 141. Станок для автоматической намотки катушек:
1 — намоточный провод, *2* — баллоногаситель, *3* — натяжное устройство, *4* — кожух, *5* — мотовило, *6* — фильера, *7* — шаблон, *8* — пульт, *9* — провододержатель

рез натяжное устройство *3*, выводит в центральное отверстие мотовила *5* и через его отдающую фильеру *6* крепит в провододержателе *9*. Затем закрывает защитный кожух *4*, который должен дойти до концевого выключателя, дающего разрешение на включение станка. Станок включается ножной педалью или с пульта *8*, и в автоматическом цикле без обрыва провода производится намотка на шаблоны всех катушечных групп. Станок останавливается, провод от мотовила крепится в провододержателе *9*, а между шаблонами и провододержателем обрезается.

Для *переноса катушечных групп на втягивающую оправку* оператор открывает кожух *4*, нажимает кнопку на пульте *8* и шаблоны складываются. Шаблоны имеют пазы *1* (рис. 142, *а*) для ввода переносного устройства в виде диска *5* (рис. 142, *б*), на котором закреплены круглые штыри *4*. Переносное устройство вводится в шаблоны и, дойдя до их конца, нажимает на спусковое устройство, которое на несколько миллиметров сближает щеки *2* и *3*, ослабляя намотку провода. Оператор стягивает руками обмотку на штыри переносного устройства и извлекает его из шаблонов. Затем пере-

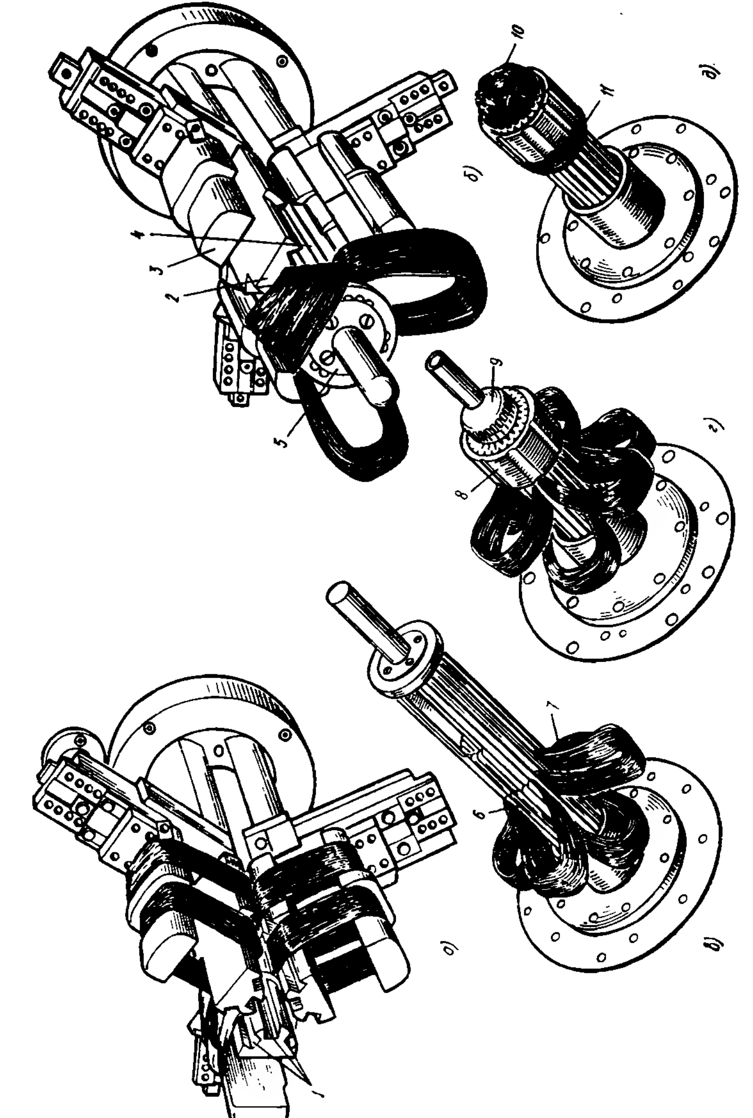


Рис. 142. Последовательность операций при переносе катушек и втягивание их в сердечник:
а — складывание шаблонов, *б* — перенос катушек на переносное устройство, *в* — перенос катушек на втягивающую оправку, *г* — надевание сердечника и фиксатора, *д* — втягивание обмотки; *1* — пазы, *2*, *3* — щеки, *4* — штыри, *5* — диск, *6* — оправка, *7* — катушки, *8* — сердечник, *9* — фиксатор, *10*, *11* — лобовые части обмотки

носное устройство вводится в штыревую оправку *6* (рис. 142, *в*) втягивающего станка. Круглые штыри *4* входят в штыри на штыревой оправке, а катушки *7* сдвигают вручную в щели между штырями штыревой оправки.

Для *втягивания и заклинивания обмотки* оператор надевает на втягивающую оправку изолированный сердечник *8* (рис. 142, *г*), устанавливает фиксатор *9* штырей и нажимает кнопку «фиксация сердечника». При этом специальные рычаги поворачиваются к сердечнику и фиксируют его от сдвига при втягивании обмотки. Затем оператор нажимает кнопку «Втягивание» и толкатель, находящийся внутри оправки (на рисунке не виден), втягивает витки в пазы статора. Одновременно с втягиванием обмотки осуществляется заклинивание пазов клина-крышкой, изготовляемой из того же материала, что и пазовая изоляция, но большей толщины. Для этого во втягивающей оправке имеется механизм резки клина-крышки и его установки в пазы (на рис. 142, *д* видны лобовые части *10* и *11* после втягивания обмотки). Лобовая часть *10* обращена внутрь сердечника и ее необходимо отогнуть. Эту операцию называют разжимом лобовой части.

Разжим лобовых частей обмотки производят несколько раз, но чаще всего дважды: после втягивания и после бандажирования лобовых частей. После втягивания он необходим для выполнения последующих технологических операций (для этого лобовые части необходимо установить на место). После бандажирования (или перед пропиткой) разжимом придают лобовым частям окончательную форму, которую они будут иметь в готовой машине, потому что после пропитки запрещены какие-либо манипуляции с пропитанной обмоткой.

Разжим после втягивания производят на конусной оправке (рис. 143, *а*), которая состоит из конусной части *1*, цилиндрического тела *2* и конического основания *3*. Сердечник *4* надевают на оправку и перемещают вниз, при этом лобовые части, находя на коническое основание, разжимаются. Разжимают последовательно обе лобовые части.

Разжим после бандажирования производят на разжимных станках. Разжимный станок имеет обойму *9* (рис. 143, *б*), в которую устанавливают и закрепляют сердечник с обмоткой. С пульта *6* включают станок, и две головки станка с помощью цилиндров *7* сдвигаются. При этом цилиндр *8* формирует внутреннюю поверхность, а прижимы *5* — наружную поверхность лобовых частей. В сомкнутом состоянии головки выдерживают 3—4 с для уменьшения упругого последействия медной проволоки.

Изолирование лобовых частей, сборку и пайку схемы и выводных концов выполняют после первого разжима лобовых частей. В лобовых частях изолируют катушки разных фаз друг от друга, устанавливают между ними с торца изоляционные прокладки, проталкивая их до торца сердечника. Затем при необходимости соединяют между собой катушечные группы в соответствии с требованием чертежа, а к концам фаз присоединяют выводные концы. При соединении провода зачищают от изоляции, а места соединения пропаивают припоем ПОС40, используя спиртово-канифольный флюс. Пайку можно выполнять паяльником, но более удобно в ванночке, которую подносят к статору и опускают в нее по очереди соединения, подлежащие пайке. После этого изолируют места пайки.

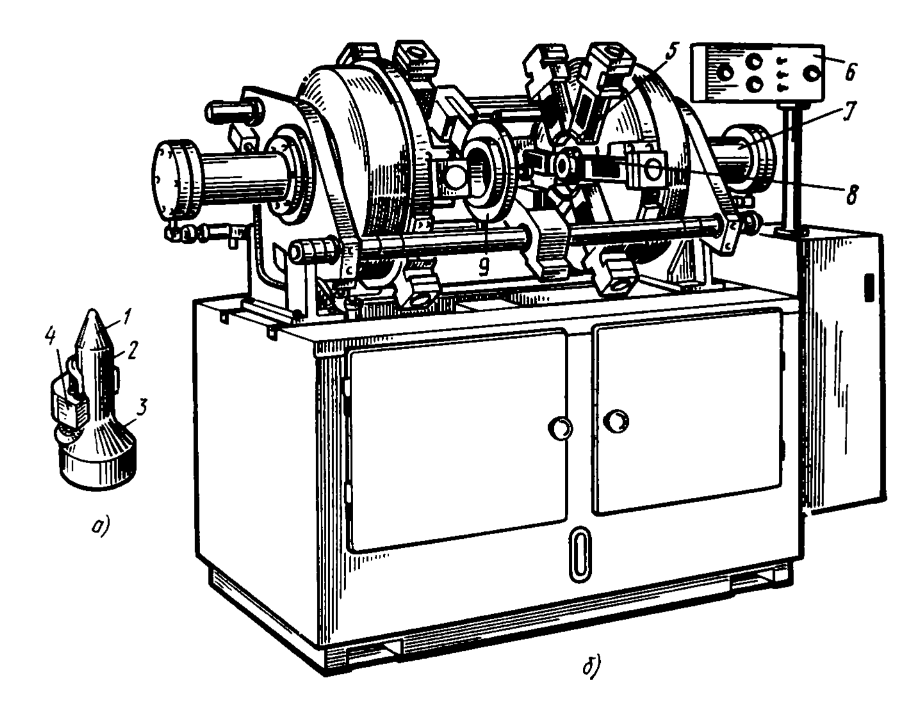


Рис. 143. Конусная оправка для разжима лобовых частей обмотки вручную (*а*) и разжимный станок для механизации процесса (*б*):

1 — конусная часть, *2* — цилиндрическое тело, *3* — коническое основание, *4* — сердечник, *5* — прижимы, *6* — пульт, *7*, *8* — цилиндры, *9* — кольцо

При проведении всех операций рабочие следят за качеством обмотки. Не допускаются завал витков между изоляцией и обмоткой, повреждение эмалевой изоляции, обрыв провода и разрыв пазовой коробочки и клиньев, смешение междуфазовых прокладок, касание витков разных фаз. Запрещается работать с инструментом, имеющим на рабочих поверхностях забоины, заусенцы, риски и другие неисправности.

Бандажирование (увязку) лобовых частей выполняют изоляционным шнуром на бандажировочных станках. В основе механизации процесса лежат различные способы петлеобразования, применяемые в швейном производстве. Бандажирование можно на-

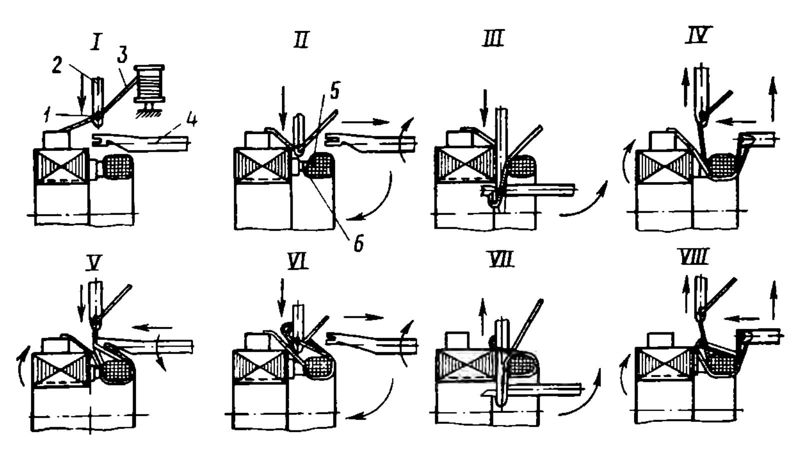


Рис. 144. Последовательность петлеобразования при бандажировании лобовой части обмотки:

1 — ушко, *2* — игла, *3* — нить, *4* — петлитель, *5* — лобовые части, *6* — просвет

дежно осуществлять, если между прямыми участками катушек при выходе из пазов имеется просвет. При механизированном бандажировании используют различные способы нанесения стежков, в том числе прямой открытой, радиусной закрытой или прямой закрытой иглой.

Рассмотрим последовательность петлеобразования на станке с помощью прямой закрытой иглы (рис. 144). Нить *3* заправляется в ушко *1* иглы *2* и крепится в зажимном устройстве (*I*). Игла совершает возвратно-поступательное движение. Чтобы петлитель *4* лучше захватывал нить, диаметр носика иглы, включая ушко, делают в 1,5—2 раза больше. Игла опускается вниз, вводит нить в просвет *6* между катушками в лобовой части *5* (*II*) и входит внутрь статора (*III*). Петлитель совершает сложное движение: он огибает лобовую часть, входит внутрь статора, поворачиваясь при этом вокруг своей оси, захватывает крючком нить (*III*) и вытаскивает ее на верх лобовой части (*IV*). Одновременно игла поднимается вверх. Затем петлитель поворачивается вокруг своей оси и вводит нить под иглу (*V*). Игла идет вниз и захватывает нить у петлителя. Петлитель отходит вправо (*VI*). Игла опускается вниз, а петлитель огибает лобовую часть, поворачиваясь при этом вокруг своей оси, и захватывает нить у иглы (*VII*). Игла поднимается вверх, а петлитель уходит вправо и вверх (*VIII*). Так выполняется одна петля. Затем статор поворачивается на одно пазовое деление, устанавливаясь просветом между катушками напротив иглы, и движения иглы и петлителя повторяются. Таким образом обматывается (бандажируется) вся лобовая часть.

После остановки станка оператор отрезает нить у иглы и завязывает ее концы.

Формование (калибрование) лобовых частей — последняя операция перед пропиткой, в которой лобовым частям придают окончательные размеры. Операцию выполняют, так же как и разжим, с применением другой оснастки.

В этом параграфе рассмотрена технология укладки обмотки при использовании отдельных станков (их производительность 60—80 тыс. статоров в год). Преимущество технологии, построенной на отдельных станках, состоит в том, что каждый станок легко обслуживать, все рабочие органы его доступны и станок можно легко переналадить на изготовление других статоров.

§ 64. Укладка обмоток статоров с распределенными пазами на агрегатных станках и автоматических линиях

При изготовлении большого количества однотипных статоров экономически целесообразно использовать агрегатные станки и автоматические линии. На агрегатном станке объединены функции двух намоточных станков и одного втягивающего. Резкое повышение производительности труда достигается в результате ликвидации ручного переноса катушечных групп на втягивающую штыревую оправку. Производительность агрегатного станка достигает 250—300 тыс. статоров в год. На автоматических линиях практически автоматизированы все операции изготовления обмотки за исключением сборки и пайки схемы и установки междуфазовой изоляции в лобовых частях. Первой операцией на автоматической линии является подача сердечника на пазоизолировочный станок, а последней — испытание сердечника с обмоткой. Высокая производительность линии достигается объединением отдельных операций и их механизацией. Как правило, линии строятся для изготовления определенной продукции и не перенастраиваются на другую. Производительность линии составляет 0,6—1 млн. шт. в год.

Агрегатный станок АНВС (рис. 145) для изготовления обмоток статоров с внутренним диаметром 40—95 мм и длиной 10—120 мм карусельного типа содержит три втягивающие штыревые оправки, расположенные на вращающемся столе *7*, две намоточные головки *2* и *3* и позицию для втягивания *8*. Станок имеет три позиции, и технологические операции осуществляются на них одновременно. На первой позиции намоточная головка *2* наматывает на шаблон катушечную группу, а затем шаблон опускается и переносит катушки на втягивающую оправку *1*. Стол поворачивается и на второй позиции на ту же оправку намоточной головкой *3* наматывается и передается другая катушечная группа. Одновременно на этой позиции кассеты набивают пазовыми клиньями. Стол опять поворачивается, и оправка с обмоткой и кассета с клиньями поступают на третью позицию втягивания *8*. На оправку надевают сер-

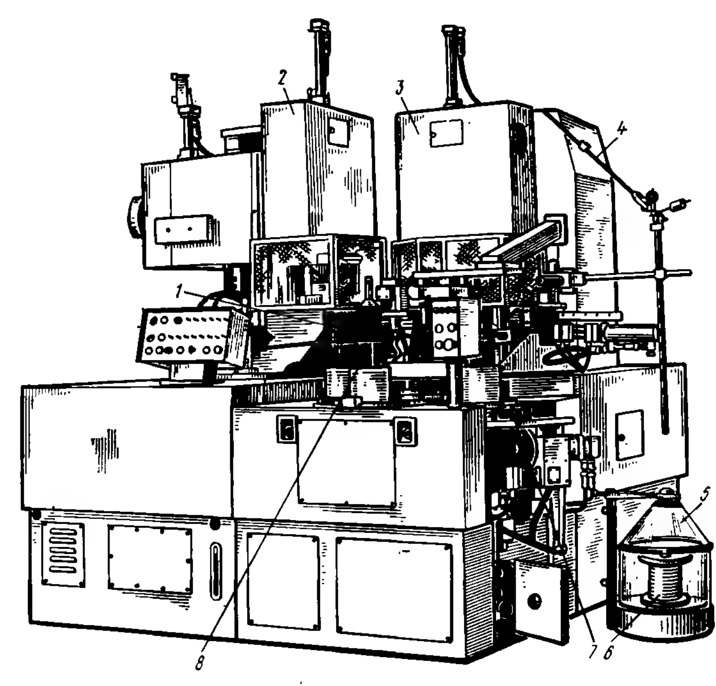


Рис. 145. Агрегатный станок АНВС для обмотки статоров:
1 — оправка, *2*, *3* — головки, *4* — направляющие, *5* — баллоногаситель, *6* — катушка, *7* — стол, *8* — позиция втягивания

дечник и производят втягивание всей обмотки и заклинивание пазов. Провод сматывается с катушки *6*, закрытой баллоногасителем *5*. Через направляющие *4* провод подается в намоточную головку. На агрегатном станке все операции автоматизированы, кроме надевания и снятия сердечника на штыревую оправку. При изготовлении однофазных статоров головка *2* наматывает главную обмотку, а головка *3* — вспомогательную. Переналадка станка — сложный процесс, поэтому производится в редких случаях.

Схема операций, выполняемых на агрегатном станке, показана на рис. 146. На позиции *I* мотовило *1* наматывает на шаблон *2* катушечную группу; шаблон опускается и переносит катушечную группу на штыревую оправку *3*. На позиции *II* повторяется намотка и перенос на оправку второй катушечной группы *4*. Одновременно из рулона изоляционного материала *7* набивают пуансоном *6* в кассету *8* клинья *5*. На позиции *III* надевают на штыревую оправку *9* сердечник *10* и толкателем *12* втягивают обмотку *11* в пазы сердечника. Одновременно в пазы устанавливают пазовые клинья. Сердечник *13* с обмоткой снимают с втягивающей оправки и передают на операцию разжима лобовых частей.

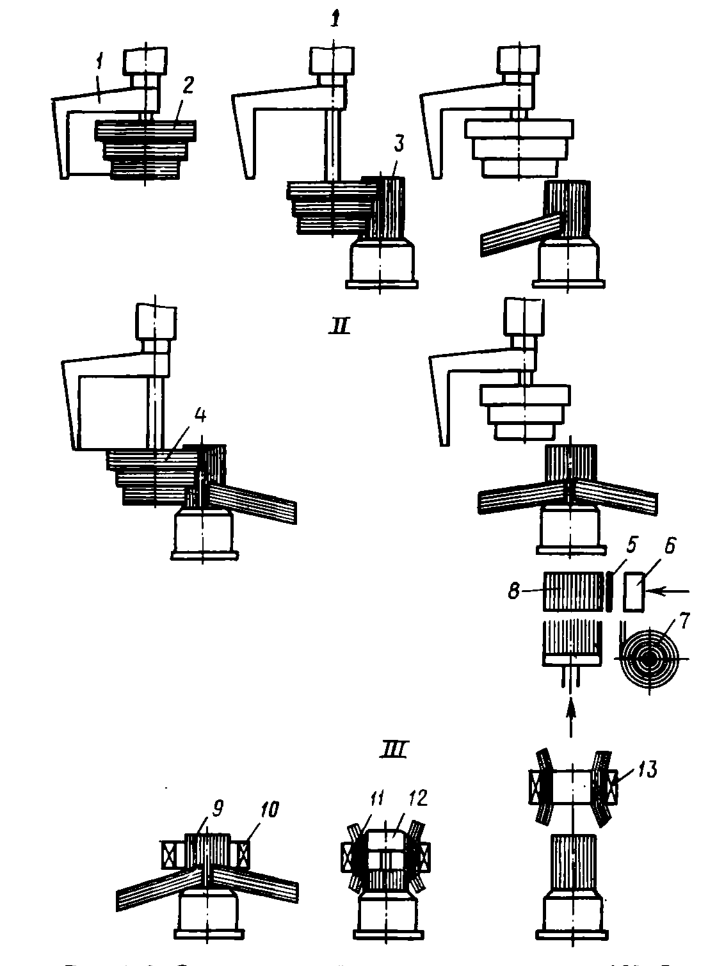


Рис. 146. Схема операций на агрегатном станке АНВС:
1 — мотовило, *2* — шаблон, *3*, *9* — оправки, *4* — катушечная группа, *5* — клинья, *6* — пуансон, *7* — изоляционный материал, *8* — кассета, *10* — сердечник, *11* — обмотка, *12* — толкатель, *13* — сердечник с обмоткой

В функции оператора входит заправка провода и изоляционных материалов, установка и снятие сердечников, наблюдение за правильной работой станка.

§ 65. Укладка обмоток статоров с явновыраженными полюсами

Статоры с явновыраженными полюсами применяют в машинах переменного и постоянного тока. В машинах переменного тока (см. § 13 и 14) конструкция сердечника статора может быть не-

разъемной (ярмо и полюсы выполнены из одного листа, см. рис. 37, *б*) или сборной (ярмо и полюсы выполнены раздельно, см. рис. 37, *в* и 38). В машинах постоянного тока конструкция статора, как правило, сборная (полюсы крепят к корпусу болтами, см. рис. 53).

При изготовлении обмоток полюсов неразъемной конструкции используют два технологических процесса — намотку катушек на шаблон, их изоляцию и надевание на полюсы и намотку катушек непосредственно на полюсы собранных сердечников, а при разъемной конструкции применяют один технологический процесс — намотку обмоток на каркас, надевание каркаса на крестовину и сборку ее с ярмом.

Рассмотрим каждый из процессов.

Намотка катушек на шаблон, их изоляция и надевание на полюсы. Катушки наматывают на шаблоны так же, как было рассмотрено ранее (см. рис. 138). Шаблоны имеют форму катушек. После намотки катушки перевязывают во избежание рассыпания витков и снимают с шаблонов. Затем катушки изолируют, обматывая лентами, сначала несколькими слоями для обеспечения электрической прочности и последним слоем для защиты от механических повреждений. Катушки между собой можно скреплять намоточным или специальным соединительным проводом, припаивая его к началу и концу катушки. Способ соединения указан в чертежах. Изолированные катушки пропитывают лаком и сушат, а затем надевают на полюсы. При необходимости перед пропиткой лобовые части катушек изгибают по радиусу сердечника. При надевании катушки на неразъемный полюс сначала заводят одну пазовую часть в паз сердечника, а затем через край полюса другую пазовую часть. Катушка должна иметь ширину несколько большую, чем ширина полюса, чтобы ее можно было надеть на него. При этом увеличивается расход медного провода (см. рис. 37, *б*).

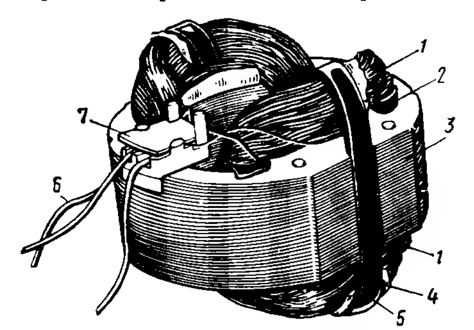


Рис. 147. Неизолированные катушки, устанавливаемые в изолированный сердечник:

1 — лобовые части, *2*, *4* — изоляция, *3* — сердечник, *5* — скобы, *6* — выводные концы статора, *7* — колодка

При сборке катушки с полюсом, который крепится к ярму болтами (см. рис. 53), катушка имеет ширину, равную ширине полюса, и повышенного расхода меди нет. Однако в этом случае усложняется конструкция статора, так как необходимо собирать отдельно каждый полюс, выполнять в нем отверстие с резьбой, отверстие в корпусе и иметь болт для соединения.

В некоторых конструкциях катушки не изолируют, а изоляцию *2* (рис. 147) укладывают непосредственно в сердечник 3 перед установкой катушки. Чтобы лобовые части *1* катушки были компактными, их крепят скобами *5*, проложив под них предварительно изоляцию *4*. Концы обмотки собственным проводом выводят на колодку *7*, изготовленную из пластмассы, а от нее гибким проводом выполняют выводные концы *6* статора.

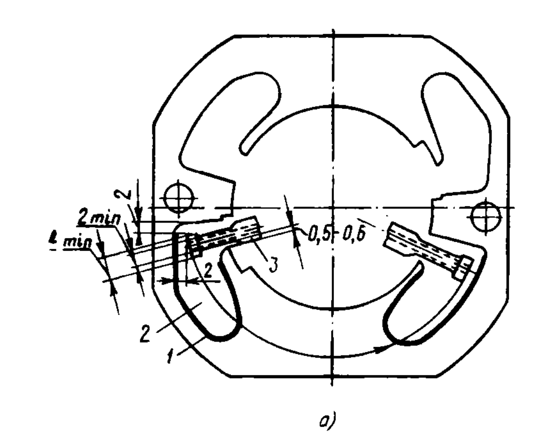
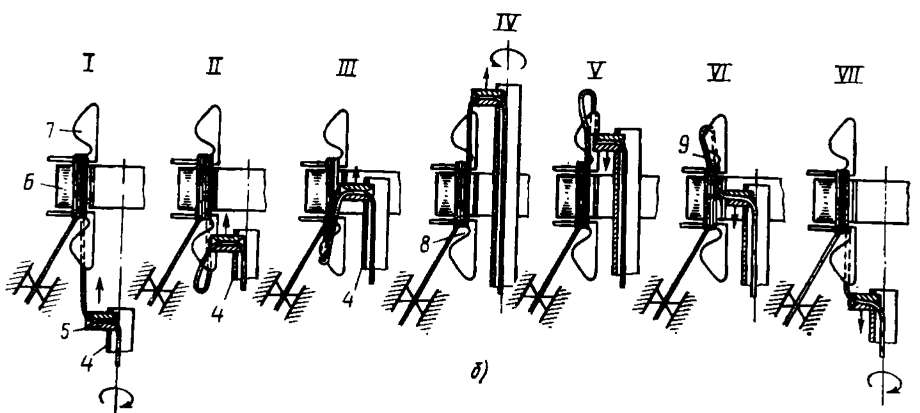


Рис. 148. Поперечный разрез сердечника статора (*а*) и последовательность операций намотки (*б*):

1 — изоляция, *2* — пазы, *3*, *5* — иглы, *4* — проводоводитель, *6* — сердечник, *7* — шаблон, *8*, *9* — углубления



Намотка катушек непосредственно на полюсы собранных сердечников. Этот процесс производят на специальных статорономоточных станках. Поперечный разрез сердечника статора показан на рис. 148, *а*. В пазы *2* укладывают изоляцию *1* и устанавливают сердечник на станок для намотки. Обмотку производят проводоводителем, который оканчивается иглой *3*. На рисунке показаны положение иглы в пазу и зазоры между иглой и сердечником, необходимые для осуществления намотки. Последовательность операций намотки показана на рис. 148, *б*. На торцы сердечника *6* около большого зубца устанавливают шаблон *7* (*I*) для образования лобовой части обмотки. При заправке провод проходит проводоводи-

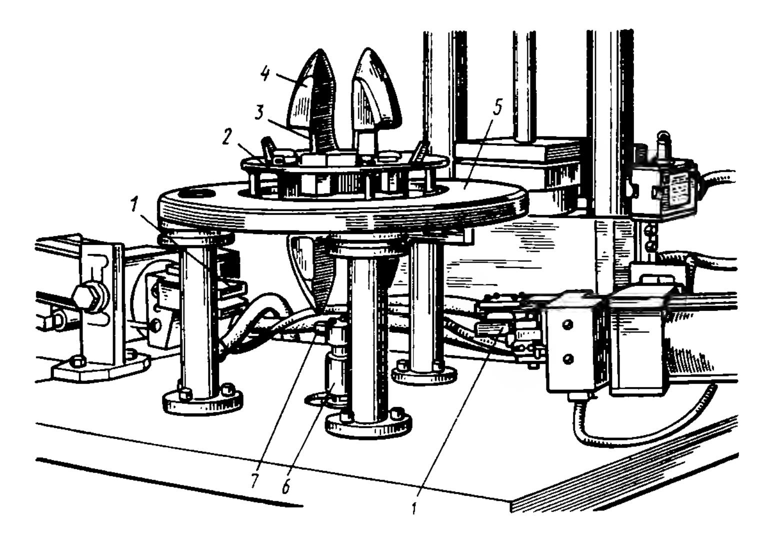


Рис. 149. Рабочие органы станка ОСН-30 для непосредственной намотки:

1 — захваты, *2* — сердечник, *3* — углубление, *4* — шаблон, *5* — обойма, *6* — проводоводитель, *7* — игла

тель *4*, выходит из иглы *5* и крепится к зажиму. Проводоводитель располагают напротив паза, с которого начинают намотку. Двигаясь вперед, он входит в паз и проходит его (*II* и *III*). Провод захлестывается за шаблон и, скользя по нему, попадает в углубление *8*, образуя одну лобовую часть. Проводоводитель выходит из статора, поворачивается на заданный угол и начинает движение в обратную сторону (*IV* и *V*), в результате чего провод захлестывается за другой шаблон, скользит по нему и, попадая в углубление *9* (*VI*), образует вторую лобовую часть. Выйдя из сердечника, проводоводитель совершает поворот (*VII*) и оказывается в начальном положении, образовав один виток. Таким образом наматывается вся обмотка.

Рабочие органы станка ОСН-30 показаны на рис. 149. Изолированный сердечник *2* устанавливают в обойму *5* и подводят к нему сверху и снизу шаблоны *4* для образования при намотке лобовых частей. Процесс происходит так. Проводоводитель *6*, имеющий две иглы *7* для намотки двух полюсов одновременно, совершает движения вверх и вниз для заведения провода в пазы и поворачивается на определенный угол около шаблонов *4* для образования лобовой части обмотки. Провод, попадая на криволинейную часть шаблона *4*, скользит по поверхности и попадает в углубление *3*, образуя лобовую часть. После намотки захваты *1*, выдвигаясь вперед, захватывают провод и со стороны сердечника откусывают его, а со стороны иглы удерживают до начала намотки следующего сердечника. После намотки снимают шаблоны и сердечник, а затем крепят лобовые части.

В последние годы широко применяют прессованные из пластмассы детали для изоляции сердечника в пазу и на торцах. В некоторых случаях изоляции придают специальную форму, что облегчает намотку катушек и позволяет отказаться от формообразующих шаблонов при намотке и креплении лобовой части. В конечном итоге повышается производительность труда при изготовлении обмотанного статора. На рис. 150 показан сердечник с пластмассовой изоляцией, которая состоит из двух частей, надевающихся на него с торцов. Изоляция позволяет изолировать пазовую часть *5*, торцы сердечника *4*, образовать поверхность *3* для придания лобовым частям необходимой формы (заменяет шаблоны), образовать выступ *2* для крепления лобовой части (замена скобы) и выступы *1* для крепления выводных концов. При намотке обмотки на сердечники с такой изоляцией не нужны шаблоны, а скорость намотки увеличивают, так как изоляция не может быть сдвинута наматываемым проводом, что возможно при изолировании отдельными простынками. В некоторых сердечниках используют комбинированную изоляцию: листовую для пазов и прессованную из пластмассы для торцов.

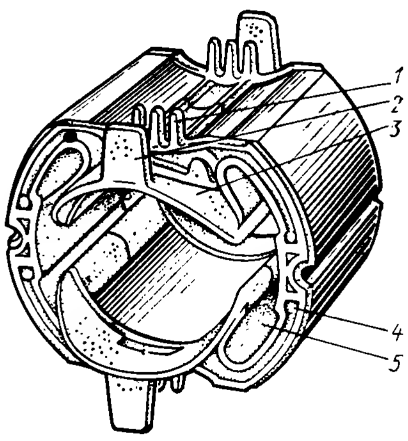


Рис. 150. Сердечник с пластмассовой изоляцией пазов

Намотка обмоток на каркас. В серийном производстве намотку обмотки на каркас выполняют на полуавтоматических станках (рис. 151). Каркасы *5* устанавливают на оправку *6*, которую поджимают центром *4*. Провод проходит натяжное устройство *3*, раскладчик *2* и крепится к каркасу. После включения станка происходит намотка необходимого количества витков, которые располагаются рядами (рядовая намотка), и станок останавливается. Счетчик *1* показывает намотанное количество витков. Провод отрезается, и конец катушки крепится к каркасу. После намотки отжимают центр *4*, снимают намотанные катушки и устанавливают каркасы.

В массовом производстве используют многоместные автоматические станки, которые имеют две позиции: на первой производится намотка обмотки (12 каркасов одновременно), а на второй (одновременно с первой) — снятие намотанных ранее катушек и надевание каркасов. На таких станках в автоматическом режиме происходит крепление первого витка, намотка всей обмотки, креп-

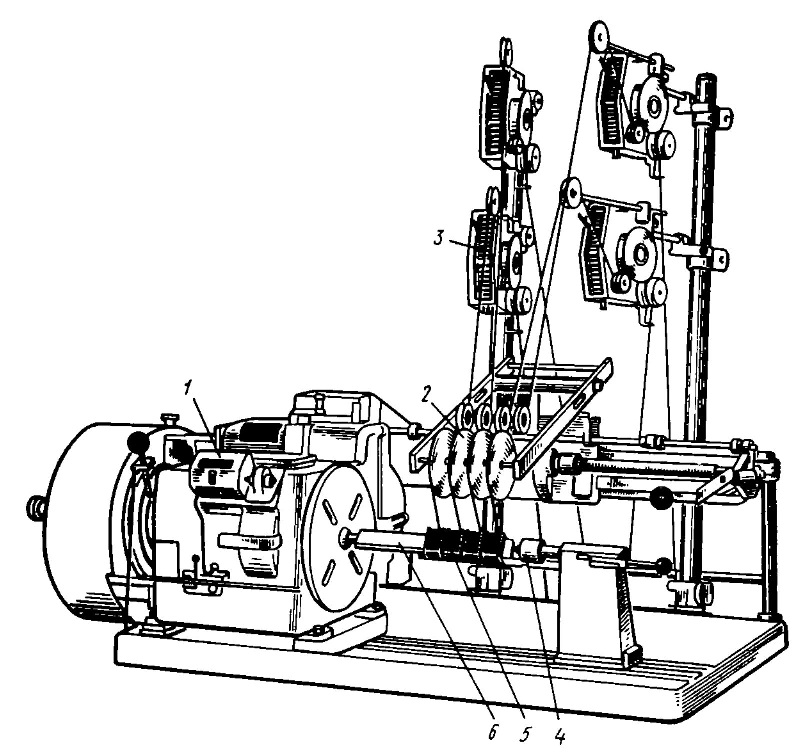


Рис. 151. Полуавтоматический станок для намоткн обмоткн на каркас

ление последиего витка, отрезка провода, его захват и подготовка для намотки следующих катушек. Каркасы под обмотку изготовляют из термопластичной пластмассы на термопластавтоматах.

Контрольные вопросы

1. Какова последовательность операцнй прн изготовленни обмоток статоров ручным способом?
2. В чем состоит принцнп укладкн обмоткн способом втягнвання?
3. Какие операцнн выполняют прн укладке обмоткн способом втягивання?
4. Какие два технологическнх процесса используют при укладке обмоткн с явновыраженными полюсами?

ГЛАВА XVII. УКЛАДКА ОБМОТОК ЯКОРЕЙ

§ 66. Изолирование лазов

Обмотка пазов якорей из круглого провода укладывается механизированным способом. Степень механизации зависит от объемов выпуска, коиструкции якоря, общей схемы техиологии изго-

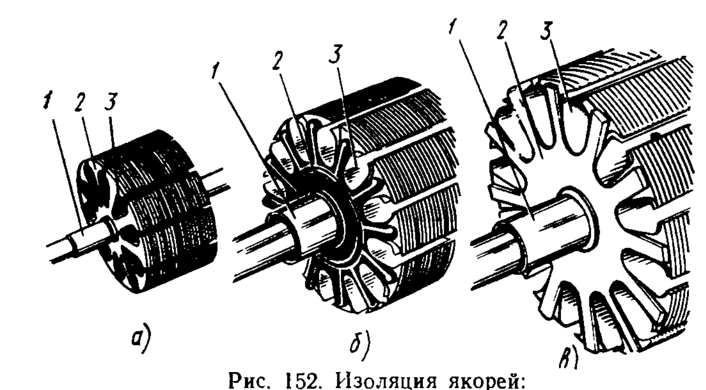


Рис. 152. Изоляция якорей:
а — изоляциониым порошком, *б* — пазовыми коробочками и прессованной втулкой, *в* — пазовыми коробочками и штампованиой втулкой

товлеиия машииы. Последовательиость операций следующая: изолироваиие пазов; иапрессоваиие коллектора; намотка обмотки; соедииеиие коицов обмотки с коллекторными пластииами; обжатие и пайка обмотки с коллектором; пропитка. В иекоторых случаях коллектор напрессовывают до изоляции пазов или после укладки обмотки. Так же могут быть совмещены операции укладки обмотки и соедииения ее концов с коллекторными пластинами.

Первой важиой операцией является изолироваиие якоря, от качества которого зависят скорость намотки провода, надежиость и долговечность работы машины. Якоря машии работают при высоких частотах вращения, и изоляция подвергается дополиительиым механическим воздействиям по сравнению с изоляцией, работающей иа иеподвижиых частях машины.

В якорях обмотка располагается в пазах и касается торца сердечиика и части вала около сердечиика, поэтому иеобходимо изолировать пазы *3* (рис. 152), торец *2* и участок вала *1*.

В якорях небольшого диаметра эффективным способом изолирования являются наиесеиие и последующая запечка изоляционных порошков (рис. 152, а). Существует много различных способов ианесения порошков. При изолироваиии якорей чаще всего используют вихревой способ в псевдоожижеиином слое порошка (рис. 153). Слой порошка *1* иаходится иа пористой перегородке *3*. При подаче воздуха через пористую перегородку частицы порошка приходят во взвешеииое состояние, образуя псевдоожи-

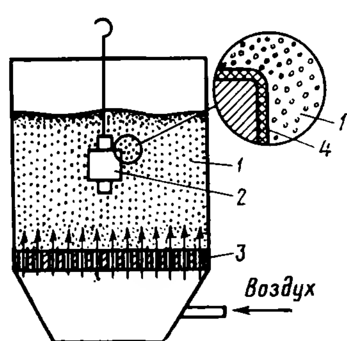


Рис. 153. Схема изолироваиия изоляциоиными порошками

жеиный слой. Якорь *2* обезжиривают, иагревают до температуры плавлеиия порошка, закрывают «масками» места, ие подлежащие изолироваиию, и иа несколько секуид опускают в псевдоожижеииый слой. Соприкасаясь с иагретыми частями якоря, порошок *1* оплавляется и образует слой покрытия *4*. Затем якорь извлекают из ванны, сиимают «маску» и запекают наиесеиный порошок в печах 1—4 ч при температуре 150—200°С в зависимости от марки порошка. При необходимости операцию повторяют два раза. Толщина изоляции,обеспечивающая нормальиую работу якоря, составляет 0,2—0,5 мм с допуском 0,05 мм. При таком способе изолироваиия все части якоря,соприкасающиеся с обмоткой, изолироваиы иепрерывиым слоем, что позволяет производить иамотку при высоких частотах вращения (изоляция не сдвииется от усилий, возникающих при воздействии провода) и исключает опасиость попадания отдельных проводников в промежутки, образуемые изоляцией вала и торца.

Нанесение изоляции способом напыления возможно при высоком качестве сердечиика якоря. Листы сердечиика должны плотио прилегать друг к другу, быть чистыми, ие иметь заусеицев и острых краев. В некоторых случаях для сиятия иезначительных заусенцев и притупления острых углов иа торцах сердечиики обезжиривают в растворах, содержащих абразивный материал.

В якорях большего диаметра пазы изолируют прокладками от изоляциоииого материала. Этот способ изолирования прииципиальио похож иа мехаиизироваиный способ изолироваиия пазов статоров (см. рис. 139). Отрезается простыика нужного размера, формуется и устанавливается в паз. Изоляция торцов и вала возможна различиыми способами. В некоторых случаях прессуют из термореактивной пластмассы деталь (см. рис. 152, *б*), которая изолирует участок вала и торцы. Ее устанавливают иа клею на якорь или плотио надевают. После иамотки и пропитки обмотки лак иадежно скрепит ее с остальиыми деталями якоря и она будет иеподвижиа во время работы. В других случаях изоляцию выполняют двумя деталями. Одну деталь, изолирующую торцы *2* (см. рис. 152, *в*), штампуют из электрокартона тем же штампом, что и листы электротехиической стали, или другим штампом, который штампует прямой зубец, надевают на вал и клеем крепят к торцу, а другую деталь (в виде трубки из электрокартоиа), изолирующую вал, надевают на него, плотно прижимая к торцу.

Изолироваииые якоря поступают иа обмотку или на сборку с коллектором.

§ 67. Намотка обмотки в пазы якорей

Последовательиость операций механизированиой намотки обмотки в пазы якорей показана на рис. 154. Якорь *1* размещают в центрах станка. В наматываемые пазы устанавливают две щеки *3* так, чтобы их края заходили в пазы и перекрывали края шлицев по высоте. Коиец провода *2* закрепляется иа якоре, и водило 4, двигаясь по окружности, производит иамотку. При этом провод попадает в паз или иа щеки и, скользя по ним, опускается в паз. При намотке с достаточио большим шагом не требуется оснастки для образования лобовой части, так как ее середииа ложится иа вал. При иебольшом шаге, когда лобовая часть может перекрывать пазы, около которых оиа проходит, иеобходима оснастка для ее формироваиия. Обмотка, как правило, наматывается двухслойная. Между слоями изоляцию не устанавливают. Первые катушки, число которых равно шагу обмотки, ложатся иа дно паза обеими сторонами, иесколько катушек — одной стороной на дно паза, а второй в паз, имеющий обмотку, и последние катушки — обеими сторонами в верхнюю часть паза.

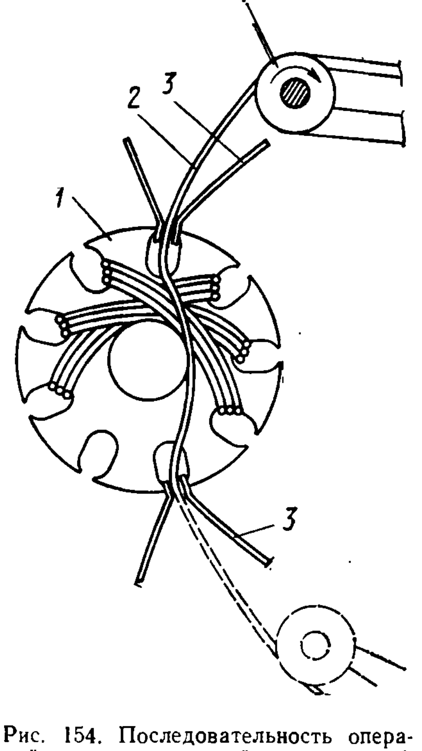


Рис. 154. Последовательность операций механизированной намотки обмотки в пазы якорей

При намотке провод заходит в пазы с определенным натягом, который обеспечивает плотиое расположеиие проводников в пазовых и лобовых частях. В коиструкции обмотки может быть или отсутствовать пазовый клии. При наличии пазовые клииья устаиавливают на стаиках, работающих по прииципу стаиков для изолироваиия пазов статоров.

Стаики для укладки обмотки якорей имеют различную степень механизации. Наиболее простые станки производят только намотку обмотки, а все остальиые операции выполияют вручную. На таких станках якорь устаиавливают в центр и опускают иа него подпружиненые щеки. Закрепляют провод около первого паза, включают станок и производят иамотку обмотки в один паз, после чего станок останавливается. Оператор отжимает щеки и поворачивает якорь иа одио пазовое деление, опускает щеки и включает стаиок для намотки обмотки в следующий паз. Так наматывается обмотка всего якоря. Одновременно при остаиовках станка опера-

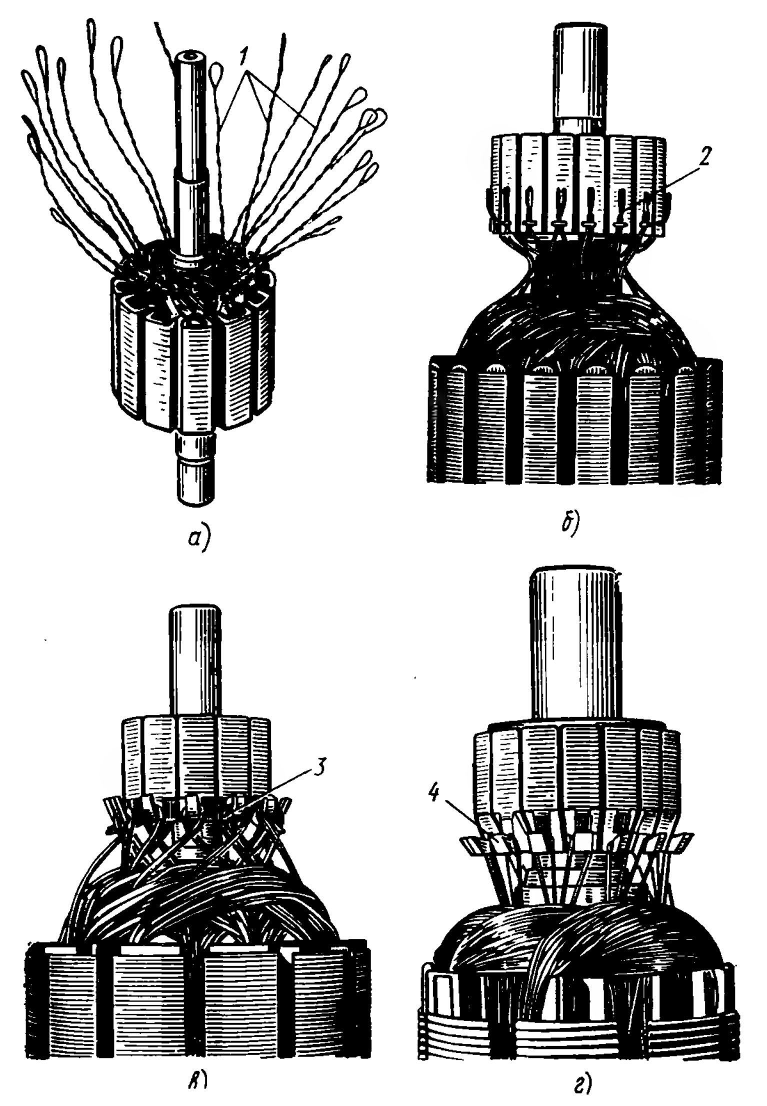


Рис. 155. Крепления обмотки с коллектором:
а — ручное, *б* — автоматическое в пазы, *в, г* — за крючки

тор делает петли *1* (рис. 155, *а*) для соединения обмотки с коллектором.

На автоматизированных станках все операции происходят в автоматическом цикле. Якоря с напрессованными коллекторами загружают в накопитель станка. Загрузочное устройство станка берет очередной якорь и устанавливает его в центре станка и ориентирует относительно щек. Щеки опускаются на пазы, а мотовило производит намотку провода в паз. По окончании намотки паза специальное устройство захватывает провод, крепит его к соответствующей пластине коллектора, при этом щеки отходят от пазов, индексирующее устройство поворачивает якорь на одно пазовое деление, щеки опускаются вниз и происходит намотка следующего паза. Так наматывается весь якорь. По окончании намотки специальный захват оттягивает провод, перекусывает его конец, идущий к якорю, и удерживает конец, идущий от мотовила. После намотки одного паза следующего якоря захват освободит удерживаемый конец провода. Загрузочное устройство снимает намотанный якорь и передает его в накопитель намотанных якорей.

При автоматической намотке провода крепят к коллектору различными способами. На рис. 155, *б* показано крепление провода в шлиц коллекторной пластины с последующей расчеканкой *2* места крепления. На коллекторных пластинах фрезеруют шлицы, при этом фрезерование необходимо выполнять с большой точностью, и устройство установки провода должно точно подходить к шлицу. Провод можно крепить захлесткой за специальные крючки, которые имеет каждая коллекторная пластина. На рис. 155, *в* показаны якорь с коллектором, изготовленным из неразделенной заготовки, и крючки, полученные отгибкой части коллекторной пластины (см. рис. 136). Толстый намоточный провод крепят к коллектору петлей *3* (см. рис. 155, *в*). Крючки *4* на пластинах можно получить выдавливанием металла на их краях (см. рис. 155, *г*). Тонкий намоточный провод может быть захлестнут на крючок, что проще, чем образование петли.

После намотки производят пайку или сварку обмотки с коллекторными пластинами. Пайку производят при соединениях, показанных на рис. 155, *а, б*. Коллектор опускают в ванночку с расплавленным припоем типа ПОС. В качестве флюса используют канифоль со спиртом. После пайки осматривают коллектор, определяя качество пайки визуально. В соединениях, показанных на рис. 155, *в, г,* сначала выполняют обжатие крючков, а затем сварку провода с коллектором. Электроды подводят к коллекторным пластинам и местам сварки и приваривают провод к коллекторной пластине токами высокой частоты. Сварку производят без припоя.

§ 68. Изготовление цилиндрической обмотки якоря

Цилиндрическая обмотка якоря была показана на рис. 75. Технологическая последовательность изготовления такой обмотки следующая: намотка, припайка к коллектору; заливка эпоксидным компаундом.

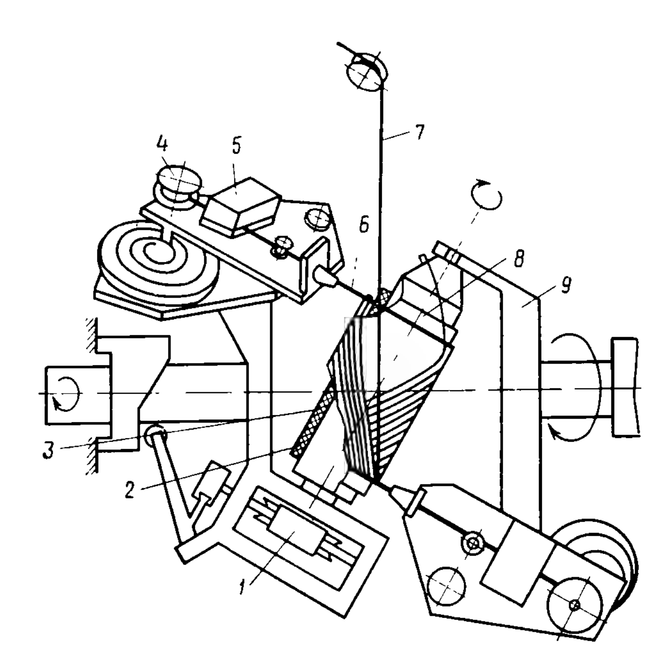


Рис. 156. Схема намотки цилиндрической обмотки:
1 — механизм, *2* — канавки, *3* — втулка, *4* — шпуля, *5* — тормозное устройство, *6* — нити, *7* — провод, *8* — оправка, *9* — кронштейн

Намотку катушки производят на выполненную в виде цилиндрического стержня оправку, в которую устанавливают вал с коллектором. На оправке имеются штырьки, расположенные на расстоянии длины внутреннего изгиба секций обмотки якоря. Оправку устанавливают в вилку с центрами. При вращении вилки происходит намотка секций. Затем обмотку освобождают от штырей и переносят на оправку заливочного устройства.

Наличие съемных штырьков увеличивает трудоемкость изготовления обмотки и снижает его качество. Намотку можно выполнять на устройстве, показанном на рис. 156. На кронштейн *9* устанавливают оправку *8* со втулкой *3*. При вращении всего устройства от шпинделя станка провод *7* укладывается на оправку *8*, огибая поддерживающие нити *6*. Нити подаются со шпули *4* через тормозное устройство *5*. После каждого полного оборота устройства оправка поворачивается на шаг намотки, равный диаметру наматываемого провода. По мере вращения оправки нить *6* наматывается на оправку вместе с намоточным проводом. Чтобы при намотке нить не сползала, на втулке *3* имеются канавки *2*, в которые она заходит. Механизм *1* обеспечивает фиксацию и поворот оправки *8*.

После намотки всей обмотки поддерживающую нить *6* вместе с проводом *7* закрепляют на оправке *8*. Оправку вместе с обмоткой снимают с устройства и сушат, затем с оправки снимают втулку *3* с обмоткой и вынимают втулку из нее. Обмотку отправляют на заливку компаундом, которую выполняют так. Нагревают оправку *7* (рис. 157, *а*) и матрицу *5* пресс-формы, надевают на оправку обмотку *6* и собирают пресс-форму. В камеру загрузки *3* помещают пресс-материал *2*, и плунжер *1* продавливает расплавленный материал через литниковую плиту *4* к обмотке *6*. Происходит заполнение формы и прессование материала. Затем пресс-форму разбирают, извлекают из нее обмотку, устанавливают в приспособление, которое обеспечивает сохранность размеров обмотки, и помещают на 4 ч в печь для термообработки. Заливку обмотки можно выполнять без вала (рис. 157, *а*) и с валом (рис. 157, *б*), при этом необходимо сделать так, чтобы обмотка легко отделялась от стенок пресс-формы, а витки не примыкали к ним, ослабляя изоляцию.

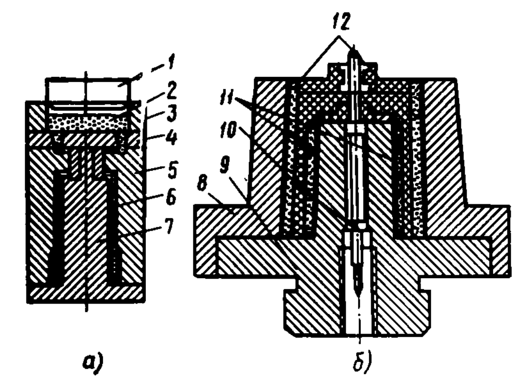


Рис. 157. Схема заливки компаундом обмотки:
а — без вала, *б* — с валом; *1* — плунжер, *2* — пресс-материал, *3* — камера загрузки, *4* — литниковая плита, *5* — матрица, *6* — обмотка, *7* — оправка, *8* — корпус, *9* — вкладыш, *10* — вал, *11* — слой смазки, *12* — фенилоновая бумага

Стенки заливочной формы покрывают антиадгезионной смазкой, а между стенками формы и обмоткой прокладывают тонкий материал, хорошо пропитываемый заливочным компаундом, например фенилоновую бумагу. Заливочная форма имеет следующий вид: на вкладыш *9* наносят слой смазки *11*, укладывают фенилоновую бумагу *12*, устанавливают обмотку *10* с валом и накрывают корпусом *8*, на стенках которого имеются смазка и бумага. В собранную форму заливают компаунд.

Контрольные вопросы

1. Какова последовательность операций при укладке обмотки ротора?
2. Какие способы изолирования ротора вы знаете?
3. Как действует станок для намотки обмотки ротора в пазы?
4. Как выполняют намотку цилиндрической обмотки ротора?

ГЛАВА XVIII. ПРОПИТКА ОБМОТОК

§ 69. Назначение пропитки

Процесс заполнения обмотки и ее изолировку специальными лаками или составами с последующей запечкой называют *пропиткой*. При пропитке лаками заполняются воздушные включения и

пустоты в обмотках и изоляции, приближая их конструкцию к монолиту. Цементируя витки обмотки, пропитка снижает механический износ изоляции. Значительно замедляются процессы теплового старения и увлажнения изоляции, так как уменьшается площадь ее соприкосновения с окружающей средой. Повышается электрическая прочность изоляции вследствие заполнения пор и капилляров обмотки лаками, имеющими более высокую электрическую прочность, чем воздух. Пропитка снижает температуру нагрева обмоток, так как теплопроводность лаков намного выше теплопроводности воздуха.

Выбирая пропиточный материал, конструктор всегда учитывает совместимость пропиточного состава с изоляцией провода и паза, Правильный выбор отдельных элементов позволяет получить надежную в работе обмотку.

В настоящее время существует большое количество пропиточных составов, которые подразделяют на лаки с растворителями и составы без растворителей.

Лаки с растворителями состоят из основы (синтетических смол) и растворителей (ксилола, толуола и др.), служащих для разжижения основы лака. В состав лака добавляют также некоторое количество сиккативов — веществ, ускоряющих процесс отвердевания основы лака после пропитки, и пластификаторов, придающих гибкость застывающей лаковой пленке. При добавлении растворителей пропиточный состав разжижается, и во время пропитки основа лака проникает внутрь обмотки и остается там после испарения растворителей.

Среди лаков с растворителями на основе синтетических смол, применяемых для пропитки обмоток электрических машин, наиболее распространены меламиноглифталевые МЛ-92, МГМ-8 (класс нагревостойкости В) и полиэфирноэпоксидный ПЭ-933, полиэфирноизоциануратный ПЭ-993 (класс нагревостойкости F). Поскольку в этих лаках содержится только 50—55 % смолы, обычно применяют двух- или трехкратную пропитку и сушку в течение 14—16 ч при методе погружения и однократную пропитку и сушку в течение 4—6 ч при методе вакуума и давления.

Стремление повысить содержание смолы в лаке и сократить время сушки привело к созданию пропиточных составов без растворителей на основе ненасыщенных полиэфирных или на базе эпоксидных смол. Полиэфирные составы, отличающиеся более низкой стоимостью и лучшей сопротивляемостью термическим ударам, применяют чаще. Для пропитки машин используют компаунды КП-18, КП-34, КП-101, КП-103, КП-50, БИД-9127 на основе полиэфиров. Имея различные вязкость, срок хранения и электроизоляционные свойства, они обладают одним общим свойством — способностью быстро затвердевать в толстом слое без выделения побочных продуктов, что позволяет использовать их для поточного механизированного производства.

Процесс пропитки в общем виде состоит: из сушки до пропитки; пропитки лаками или составами; сушки после пропитки для удаления растворителей и запечки твердой основы.

§ 70. Пропитка лаками методом погружения

Сушку до пропитки производят в печах при 120 °С в течение 1—3 ч. При этом удаляется влага из изоляции и происходит снятие внутренних напряжений в лаковой пленке на проводе, появившихся в результате воздействия на провод при намотке и укладке. После сушки обмотку охлаждают до 60—70 °С и устанавливают в ванну с лаком. Лак под действием гидростатического давления и капиллярных сил проникает в обмотку, вытесняя воздух, содержащийся в пространстве между проводниками. Для лучшего проникновения в обмотку лак должен иметь небольшую вязкость (обычно 30—40 с по вискозиметру ВЗ-4 при 20 °С). Изделие выдерживают в лаке от 20 мин до 1 ч, а затем извлекают из ванны и устанавливают на стол с решеткой для стекания излишков лака. Салфетками, смоченными растворителем лака, замывают места, где присутствие лака не допускается (внутренняя поверхность статора, замки для надевания щитов, выводные концы и т. п.). Далее изделие сушат 6—12 ч в печах, регулируя температуру в две ступени.

При первой ступени сушку осуществляют при температуре испарения растворителя лака (примерно 110—120 °С), а при второй ступени — при температуре полимеризации твердой основы лака.

Однократной пропиткой не удается качественно пропитать обмотку. Маловязкий лак хорошо заполняет обмотку, но и частично вытекает из нее при замывке и сушке. Поэтому используют двукратную (а иногда трехкратную) пропитку. Заполнение пор и пустот в изоляции обмоток происходит при первой пропитке, называемой основной; последующие пропитки являются покровными.

Процесс пропитки погружением может быть механизирован. При больших количествах изделий строят непрерывный подвесной конвейер, на который подвешивают изделия, проходящие при движении конвейерной цепи заданное число пропиточных ванн и сушильных печей.

Технологический процесс пропитки погружением является универсальным, но и наименее экономичным, наиболее трудоемким при низких комфортных условиях работы, при этом качество пропитки невысокое.

§ 71. Пропитка лаками методом вакуума и давления

При пропитке методом вакуума и давления изделие подвергают предварительной сушке и помещают в автоклав, из которого выкачивают воздух, создавая вакуум. Затем, не снимая вакуума,

подают в автоклав лак, который хорошо заполняет промежутки в обмотке из-за отсутствия воздуха. После того как уровень лака в автоклаве станет выше изделия, снимают вакуум и создают давление, которое, действуя на зеркало лака, способствует его лучшему проникновению в обмотку. Затем снимают давление, удаляют лак из автоклава и создают вакуум, при котором снижается точка кипения растворителя и часть растворителя удаляется из обмотки, из-за чего лак становится более вязким. Изделия извлекают из автоклава и в зависимости от принятой технологии либо производят замывку, а потом отправляют на сушку (в неавтоматизированных установках), либо сразу подвергают сушке (в автоматизированных установках).

Отсутствие воздуха в изделии в момент заполнения лаком, а также создание давления после того, как лак заполнил автоклав, способствует глубокому проникновению лака в обмотку. При таком методе пропитки можно использовать лак с вязкостью 65—110 с. Создание вакуума после пропитки способствует частичному испарению летучих веществ и повышает вязкость лака, при этом лак становится настолько вязким, что не вытекает из обмотки. Все это позволяет за однократную пропитку получить изделие такого же качества, как при двукратной пропитке методом погружения, а в некоторых случаях и выше. Метод вакуума и давления особенно эффективен при пропитке многовитковых изделий из тонкого провода.

В массовом производстве пропитку в вакууме и под давлением выполняют на автоматизированных установках АВБ, которые выпускают с автоклавами различного диаметра. На рис. 158 показана схема установки АВБ-32.

Процесс пропитки и сушки на этих установках происходит так. Загруженные на подвеску статоры поступают в камеру предварительной сушки *5*. Затем статоры перемещаются в автоклав *4*, в котором осуществляются: вакуумирование до остаточного давления 3 кПа; заполнение автоклава лаком и снижение давления до 20 кПа; повышение давления до 200—300 кПа; снятие давления и слив лака; вакуумирование при остаточном давлении 10 кПа; раскрытие автоклава и перемещение подвески в проходную сушильную печь *3*. Сушку производят 3—6 ч в две ступени. После охлаждения изделия подают к месту *1* загрузки и выгрузки. Цепной конвейер *2* с подвесками для пропитываемых изделий совершает прерывистое движение. Такт конвейера можно регулировать от 6 до 16 мин.

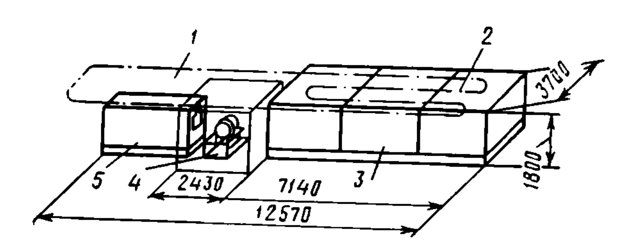


Рис. 158. Схема пропиточной установки АВБ-32

Оригинальна конструкция автоклава, представляющего собой шарообразный сосуд, разделенный на две части, которые автоматически раздвигаются, позволяя проникнуть внутрь подвеске с изделиями, а затем сдвигаются, образуя герметизированную камеру. Схема автоклава в сомкнутом состоянии показана на рис. 159. Половинки автоклава *6* и *12* герметизируются и удерживаются вместе замком *2*, который имеет резиновое уплотнение. Лак подается снизу через трубопровод *3*. Для контроля уровня лака имеются указатели нижнего *4* и верхнего *5* уровней. Вакуум и давление создаются через трубопровод *7* и измеряются вакуумметром *11*. Подвеска *10* с изделиями *1* крепится к цепи конвейера *8* с помощью стальной пластины *9* толщиной 0,3 и шириной 40—60 мм. Пластина проходит через резиновое уплотнение, при этом герметизация автоклава не нарушается.

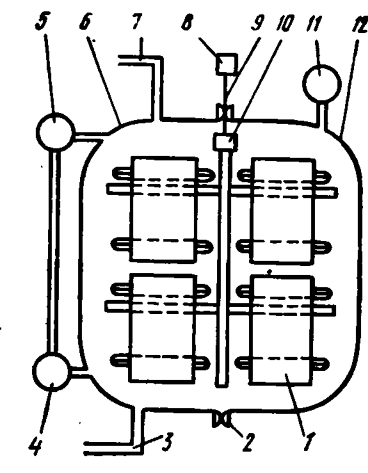


Рис. 159. Схема автоклава с подвеской и статорами:

1 — изделие, *2* — замок, *3*, *7* — трубопроводы, *4*, *5* — нижний и верхний уровни, *6*, *12* — половинки автоклава, *8* — конвейер, *9* — пластина, *10* — подвеска, *11* — вакуумметр

§ 72. Пропитка составами без растворителей

Пропитку составами без растворителей выполняют обычно струйным способом, который состоит в том, что статор или якорь (ротор) подключают к источнику тока низкого напряжения, нагревающему обмотки до 80—100°С. На нагретую обмотку *3* (рис. 160) через сопло *2* тонкой струей подают пропиточный состав *1*. При этом статор или якорь устанавливают в наклонное положение и вращают с частотой 20—30 об/мин. При соприкосновении состава с нагретой обмоткой вязкость его снижается, что способствует лучшему проникновению состава в обмотку. В результате наклонного положения пропитываемого изделия состав проникает между проводниками и в лобовую часть обмотки, находящуюся внизу. Подача состава строго дозирована. По окончании пропитки изделие поворачивают в горизонтальное положение и продолжают вращать для равномерного распределения пропиточного состава

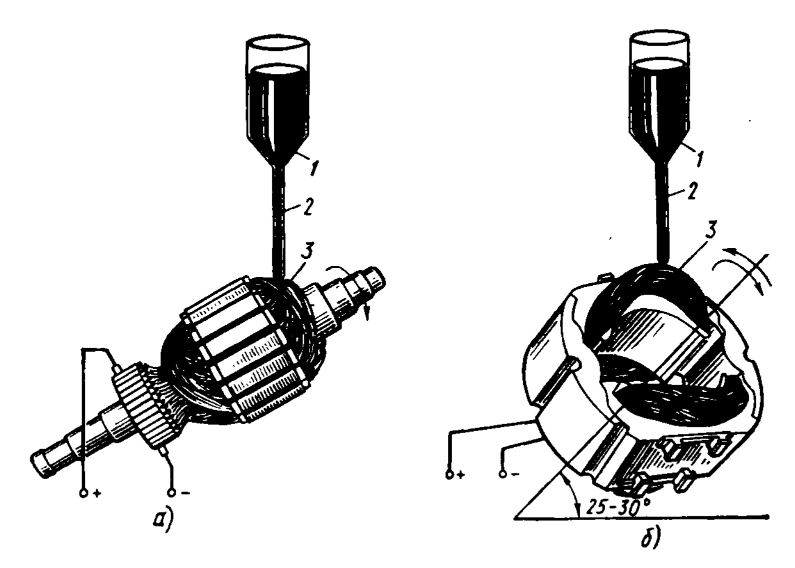


Рис. 160. Схема струйной пропиткн ротора (*а*) н статора (*б*)

по обмотке. Температура обмотки повышается, происходит желатинизация, а затем полное отверждение пропиточного состава.

При разработке технологического процесса выбирают угол наклона изделия, частоту вращения, дозу пропиточного состава, программу нагрева. Якоря (рис. 160, *а*) и статоры с распределенными пазами вращают непрерывно, а статоры с явновыраженными полюсами (рис. 160, *б*) поворачивают на угол, обеспечивающий попадание пропиточного состава на лобовые части обмотки, находящиеся на одной линии с пазовыми.

При пропитке составами без растворителей практически не выделяется вредных веществ, поэтому такие установки допускается размещать в общем технологическом потоке. Процесс может быть механизирован.

На рис. 161 показана автоматическая установка для пропитки статоров, которая имеет вращающийся стол *7* с приспособлениями *4* для закрепления статоров, устройства для дозирования пропиточного состава *2*, сопло *3* для подачи состава на обмотку. Для нагрева обмоток напряжение подается через коллектор *5* на токосъемник *6*. Периодический поворот стола осуществляется поворотным устройством *1*. Установка имеет несколько позиций для креплеиия изделий. Такт работы регулируется в широких пределах.

Порядок работы следующий. На первой позиции оператор устанавливает статоры для пропитки и снимает пропитаиные. На второй позиции осуществляется нагрев обмотки, на третьей и четвертой — подается на обмотку пропиточный состав, на последую-

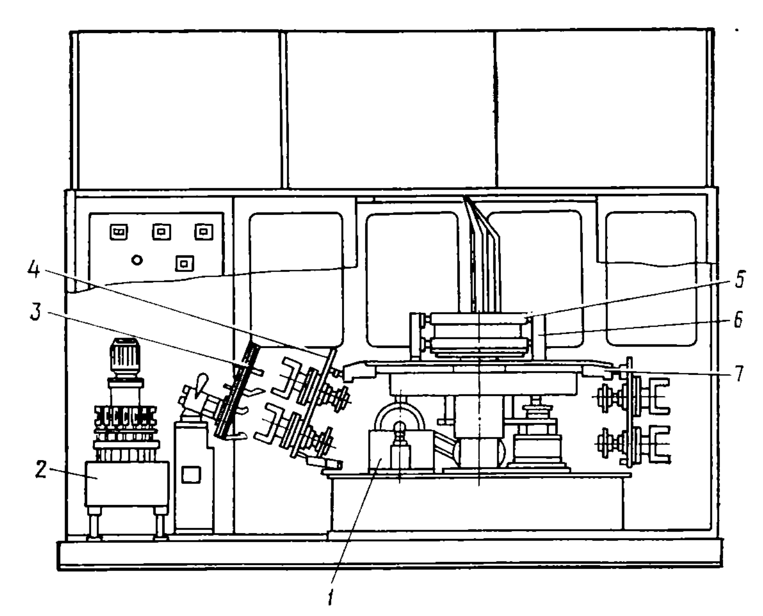


Рис. 161. Схема установкн для пропитки статоров струйным методом:

1 — поворотное устройство, *2* — устройство для дозирования лака, *3* — сопло, *4* — прнспособления, *5* — коллектор, *6* — токосъемник, *7* — стол

щих — происходит его сушка. На последней позиции прекращается подача напряжения и обмотка охлаждается.

Автоматические установки разработаны для пропитки обмоток статоров и роторов разных габаритных размеров.

К достоинствам способа относят малый расход пропиточного состава (подается только на обмотку), отсутствие замывки какихлибо поверхностей, небольшие площади под оборудование, высокое качество пропитки.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение пропнтки обмоткн?
2. Какне пропнточные матерналы используют прн пропнтке?
3. Какне способы пропнткн лакамн вы знаете?
4. Какой применяют способ пропнтки составами без растворнтелей?

ГЛАВА XIX. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ РОТОРОВ

§ 73. Общие сведения

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутой обмоткой на роторе являются самыми распространенными. Их обмотку чаще всего изготовляют заливкой алюминия, что является наиболее про-

грессивным технологическим процессом, позволяющим получить за одну операцию обмотку, состоящую из стержней в пазу и замыкающих их колец. Заливка алюминием, выполняемая при любой форме паза, позволяет иметь двигатели с различными характеристиками. Вместе с короткозамыкающими кольцами могут быть отлиты вентиляционные лопатки, которые отводят теплоту от пазовой части, а также являются лопастями вентилятора.

Технологический процесс заливки является сложным, так как форма алюминиевой обмотки не удовлетворяет требованиям литейного производства. В соединении стержней и колец имеются резкие переходы (от тонких стержней к толстым кольцам). В этих местах могут наблюдаться обрывы стержней при остывании металла. Масса сердечника ротора в несколько раз больше массы алюминия, поэтому для равномерного распределения алюминия во время заливки по всей форме паза сердечник необходимо нагревать до 350—500°С либо производить заливку под давлением с большой скоростью, чтобы алюминий заполнил пазы, не успев остыть. В процессе остывания алюминий дает усадку до 2%, что следует учитывать при проектировании оснастки и разработке технологического процесса.

Сложность заливки состоит также в том, что расплавленный алюминий активно окисляется, а оксидная пленка, обладая электроизоляционными свойствами и попадая в пазы и кольца, может привести к обрывам стержней, неполной заливке, образованию трещин. Во избежание насыщения примесями расплавление алюминия производят в графитовых тиглях.

Для заливки служит только первичный алюминий, т. е. полученный с металлургических заводов. Алюминий, взятый от литниковой системы отлитой детали, запрещается использовать для заливки обмотки, так как он не является чистым, а обмотка, отлитая из него, имеет по сравнению с обмоткой, залитой первичным алюминием, более высокое сопротивление, что ухудшает показатели машины.

Качество и производительность заливки во многом зависят от ее способа. При изготовлении машин малой мощности чаще всего используют заливку под высоким давлением. Хотя при этом способе применяют дорогое оборудование и сложную оснастку, он оправдывает себя, поскольку более производителен и не требует предварительного подогрева сердечника.

Короткозамкнутую обмотку ротора выполняют также установкой в пазы медных стержней и соединением их по торцу с медным короткозамыкающим кольцом сваркой (см. рис. 13, *б*). Трудоемкость изготовления такой обмотки в несколько раз выше, чем заливкой, и ее используют, когда заданные характеристики машины нельзя получить другим способом или когда выпуск машин очень мал и экономически не оправдано приобретение сложного оборудования и оснастки.

§ 74. Изготовление обмотки заливкой алюминия

Заливку алюминия под высоким давлением выполняют на литейных машинах с использованием пресс-форм. Технологический процесс и оборудование при этом способе такое же, как и при отливке конструкционных деталей (см. § 46), но имеет некоторое отличие. На этих машинах требуется большее усилие для смыкания пресс-форм, так как при заливке необходимо высокое давление.

Заливку осуществляют так. В литейную пресс-форму (см. рис. 108) устанавливают сердечник ротора, набранный на оправку, или технологический вал, пресс-форма смыкается и в нее под давлением подается алюминий. После остывания алюминия пресс-форму раскрывают и извлекают ротор.

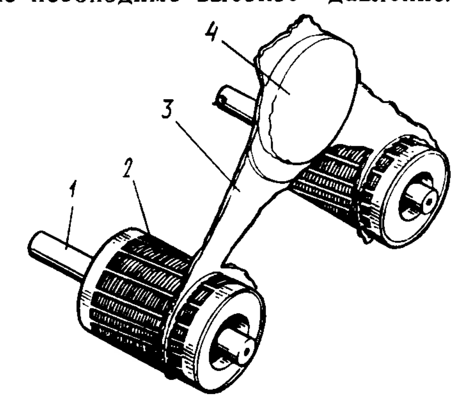


Рис. 162. Роторы, извлеченные из пресс-формы

На рис. 162 показаны два ротора, извлеченных из двухместной пресс-формы. Роторы устанавливают на пресс и отделяют от сердечника *2* литник *3* и остатки металла из цилиндра *4*. Затем на другом прессе из сердечника выпрессовывают технологический вал *1*.

Качество заливаемых роторов зависит от многих причин, в том числе от температуры заливаемого металла, скорости заливки, давления, длительности подпрессовки, ускорения движения поршня заливочной машины. Подпрессовка необходима для питания отливки металлом при затвердевании. Типовой технологический процесс заливки имеет следующие параметры: давление 50—60 МПа, скорость заливки 0,5—1 м/с, температуру алюминия 690—700°С.

Технологические процессы заливки обмотки способами, используемыми при изготовлении машин средней и большой мощности (статическим, вибрационным, центробежным и под низким давлением), применяют редко.

§ 75. Изготовление обмотки сваркой

В сварных роторах микромашин стержни, устанавливаемые в пазах, изготовляют чаще всего из круглой медной проволоки или прутков. Материал правят на прессе, разрубают на заготовки нужной длины. На обоих концах стержней снимают фаску для

улучшения сборки с сердечником и короткозамкнутым кольцом и образования канавки для заполнения припоем. Стержни с торца забивают в пазы сердечника.

Короткозамыкающие кольца штампуют из листового материала или отрезают из круглого проката. В кольцах сверлят отверстия по числу пазов ротора. С каждой стороны кольца у отверстий снимают фаску для лучшей сборки со стержнями и образования канавки для заполнения припоем. Кольца надевают на стержни и размещают равномерно с обеих сторон ротора.

Пайку короткозамкнутых колец и стержней производят припоями. Место сварки разогревают угольным электродом и на него подают припой, который расплавляется и заполняет канавку, образованную фасками на кольце и стержнях. При пайке под действием капиллярных сил припой затекает в отверстие кольца между стержнем и стенками отверстия.

Контрольные вопросы

1. Какой алюминий используют при заливке роторов?
2. Какие оборудование и оснастку применяют при заливке роторов под высоким давлением?
3. Как изготовляют сварные обмотки роторов?

ГЛАВА XX. СБОРКА УЗЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

§ 76. Методы достижения точности при сборке

Сборка — заключительный технологический процесс. От правильно выбранного технологического процесса и качественного выполнения его операций зависят надежность и долговечность электрических машин, а также их энергетические показатели.

Процесс сборки состоит из следующих этапов: сборка из отдельных деталей сборочных единиц (узловая сборка) и сборка предварительно собранных единиц, деталей и покупных изделий электрической машины (общая сборка). В предыдущих главах рассмотрены технологические процессы сборки сердечников, статора и ротора, коллектора в соответствии с последовательностью операций технологического процесса. В этой главе приведена сборка ротора и статора.

Детали при соединении в сборочные единицы и сборочные единицы при соединении в готовое изделие должны сохранять определенное положение в пределах заданной точности. В одних случаях при сборке должен быть выдержан зазор, обеспечивающий взаимное перемещение деталей, в других — необходимый натяг, обеспечивающий прочность соединения.

При конструировании машин и проектировании технологических процессов их изготовления производят размерный анализ для определения правильных соотношений размеров взаимосвязаных деталей и значений допустимых отклонений (допусков). Подобные расчеты выполняют на базе теории размерных цепей.

Совокупность взаимосвязанных размеров, образующих замкнутый контур и определяющих взаимное положение поверхностей (или осей) одной или нескольких деталей, называют *размерной цепью*. Замкнутость размерной цепи приводит к тому, что размеры, входящие в цепь, не могут быть выбраны независимо, т. е. значение и точность по крайней мере одного из размеров определяются остальными. Размерная цепь состоит из отдельных звеньев.

Каждый из размеров, образующих размерную цепь, называют *звеном*. Любые линейные или угловые параметры могут быть звеньями. Любая размерная цепь имеет одно замыкающее (исходное) и два или более составляющих звеньев. Замыкающим является звено, исходное при постановке задачи или получающееся последним в результате ее решения. Таким образом, замыкающее звено непосредственно не выполняется, а представляет собой результат выполнения (изготовления) всех остальных звеньев цепи.

В соответствии с ГОСТом предусматривают следующие методы достижения точности замыкающего звена (ранее назывались методами сборки): полной взаимозаменяемости; неполной взаимозаменяемости; групповой взаимозаменяемости; пригонки; регулирования.

Метод полной взаимозаменяемости предусматривает сборку без какой-либо дополнительной обработки деталей, их подборки или пригонки. Он экономичен там, где капитальные затраты на оснащение производства окупаются экономией, получаемой при сборке большого количества изделий. Достоинствами этого метода являются ускорение сборки, снижение ее трудоемкости и увеличение выпуска изделий. При эксплуатации и ремонте обеспечивается быстрая замена изношенных деталей и сборочных единиц без какой-либо пригонки. К недостаткам метода относят меньшие по сравнению с другими допуски на составляющих звеньях, что приводит к повышению трудоемкости механической обработки.

Метод неполной взаимозаменяемости предусматривает сборку, как правило, без пригонки, регулировки, подбора, при этом у небольшого количества изделий (обычно 3 изделия на 1000) значения замыкающего звена могут выйти за установленные пределы, в результате чего возможны дополнительные затраты на замену или подгонку некоторых деталей. Преимущества этого метода те же, что и метода полной взаимозаменяемости плюс экономия, получаемая при механической обработке за счет расширения полей допусков.

Метод групповой взаимозаменяемости (селективной сборки) предусматривает сборку без пригонки и регулировки. После изго-

товления собираемые детали рассортировывают по фактическим размерным группам. При сборке соединяют детали соответствующих (одинаковых) групп для получения размера замыкающего звена в заданных пределах. К преимуществам метода относят возможность достижения высокой точности замыкающего звена при экономически целесообразных допусках размеров составляющих звеньев, а к недостаткам — увеличение незавершенного производства, дополнительные затраты на проверку и сортировку деталей, усложнение снабжения запасными частями.

Метод пригонки предусматривает сборку за счет пригонки заранее намеченной детали (компенсатора), на которую при механической обработке (под сборку) устанавливают определенный припуск. Необходимый съем припуска компенсатора определяют после предварительной сборки деталей и измерений. Преимуществом метода является возможность установления экономически целесообразных допусков на изготовляемые детали, а недостатками — значительное удорожание сборки и удлинение ее сроков.

Метод регулирования предусматривает сборку за счет изменения размера компенсирующего звена без снятия стружки. Это изменение обеспечивается подбором сменных деталей (прокладок, колец, втулок) или специальными конструкциями компенсаторов с помощью непрерывных либо периодических перемещений деталей по резьбе, клиньям, коническим поверхностям. К преимуществам метода относят возможность установления экономически обоснованных допусков и регулирования размера замыкающего звена не только при сборке, но и в эксплуатации для компенсации износа, а к недостаткам — усложнение конструкции, увеличение количества деталей в размерной цепи, усложнение сборки.

Электрические машины различны по конструкции, назначению, массе и другим показателям. Производство электрических машин осуществляется от единичных экземпляров до нескольких сотен тысяч. При их сборке применяют все указанные методы.

В поточно-массовом производстве при сборке машин из готовых узлов в основном используют метод полной взаимозаменяемости. Статор, ротор, подшипниковые щиты взаимозаменяемы. Однако отдельные узлы собирают методом пригонки. Например, при сборке сердечника статора и корпуса для достижения необходимой соосности внутреннего диаметра сердечника и замков корпуса механическую обработку замков производят на базе внутреннего диаметра сердечника. Таким же методом получают соосность наружного диаметра сердечника ротора и шеек вала под посадку подшипника.

§ 77. Разбираемые соединения

При сборке различают два вида соединений: подвижные и неподвижные. Подвижные соединения обеспечиваются посадками с

зазором, на шпонку и шлицы. Такие соединения допускают разборку деталей без их повреждения. Неподвижные соединения обеспечивают неизменное положение собранных деталей и могут быть неразбираемыми и разбираемыми. Неподвижные неразбираемые соединения выполняют сваркой, клепкой, пайкой, склеиванием, а также посадками с натягом, неподвижные разбираемые соединения — посадками с зазором, при этом неподвижность собираемых деталей обеспечивается шпонками, болтами, штифтами. Разбираемые соединения должны быть точными, прочными, допускать многократную сборку и разборку и не иметь вмятин, забоин и т. п.

Разбираемые соединения чаще всего получают, используя резьбовые соединения болтами с гайками, ввертными болтами, шпильками и гайками (рис. 163).

Соединение болтами с гайками применяют при выполнении сквозных отверстий в стягиваемых деталях. При сборке и разборке этих соединений необходимо страховать болт от проворачивания при завертывании или отвертывании гайки, а также фиксировать его в осевом направлении. При таком соединении приходится манипулировать двумя деталями, что не всегда удобно (рис. 163, *а*).

Соединение ввертными болтами используют при установке болта только с одной стороны соединения (рис. 163, *б*). Одна деталь имеет сквозное отверстие без резьбы, а другая — глухое или сквозное отверстие с резьбой. Деталь с резьбовым отверстием должна быть выполнена из материала, который хорошо держит резьбу (сталь, чугун, бронза). В детали из мягких сплавов (алюминиевых, цинковых) вводят нарезные втулки из более твердого материала. При сборке таких соединений манипулируют только одной деталью — болтом, что более удобно, чем манипулировать болтом и гайкой.

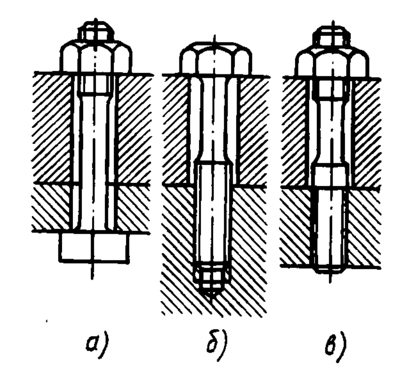


Рис. 163. Виды соединений:
а — болтом с гайкой, *б* — ввертным болтом, *в* — шпилькой и гайкой

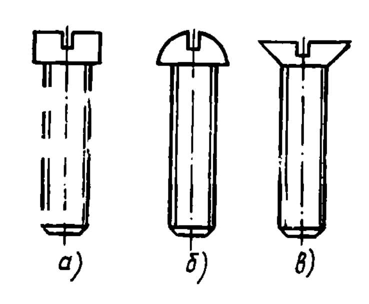


Рис. 164. Винты под отвертку с различными головками:
а — цилиндрической, *б* — полусферической, *в* — конической

Соединение шпильками применяют в основном для деталей из мягких сплавов для глухих или сквозных отверстий, когда установка ввертных болтов невозможна (рис. 163, *в*). Шпилька имеет резьбу на обоих концах. Один конец шпильки завертывают в нарезное отверстие детали из мягкого материала, при возможности с натягом или стопорят. При сборке и разборке на другой конец шпильки навертывают гайку. Таким образом, в деталь из мягкого материала шпильку завертывают только один раз, что позволяет иметь надежное соединение.

Поверхности на деталях, к которым прилегают опорные поверхности гаек и головок болтов, должны быть ровными и перпендикулярными оси отверстий. Перекос опорной поверхности обычно приводит к обрыву болтов. Опорные поверхности на деталях получают механической обработкой.

При сборке резьбового соединения под действием усилия затяжки происходит вытяжка болта, поэтому правильная сборка резьбового соединения зависит от выбранного усилия затяжки болта или гайки. Затяжку неответственных резьбовых соединений осуществляют обычными гаечными ключами без устройства для контроля прилагаемого усилия, при этом во избежание приложения слишком больших усилий затяжки и разрушения крепежных деталей ограничивают длину рукоятки ключа (обычно составляет не более 15—20 диаметров резьбы).

При многоболтовых соединениях сначала выполняют затяжку болтов, расположенных посередине детали, а затем по ее краям. Если болты расположены по окружности, их затягивают крест-накрест в два-три приема. При первом приеме болты (гайки) наживляют и завертывают до подхода к опорной плоскости детали, при втором и третьем приемах постепенно затягивают их, используя накидные и торцевые ключи.

Соединения винтами под отвертку применяют для крепления мелких деталей в ненагруженных соединениях (рис. 164, *а*, *б*, *в*). Из всех типов винтов наиболее предпочтительны потайные и полупотайные с коническими головками, позволяющими выполнить соединение без выступающих частей. Однако они имеют существенный недостаток, так как требуют очень точного совмещения резьбового отверстия одной детали и конического отверстия для головки винтов другой детали.

В последнее время чаще всего применяют винты с крестообразным пазом под отвертку специальной формы. Их можно затягивать с большим усилием, при этом исключается срыв отвертки, а также облегчается механизация завертывания.

Все нарезные крепежные детали машин должны быть надежно застопорены от самоотвинчивания. Несоблюдение этого правила приводит к серьезным последствиям, особенно при самоотвинчивании болтов и гаек внутри машины. Наибольшая вероятность самоотвинчивания резьбовых соединений у механизмов и машин, работающих при вибрациях и толчках. Различают способы стопорения жесткие и фрикционные.

При жестком стопорении стопоримая деталь соединяется со стопорящей жесткой связью — стопором. Самоотвинчивание стопоримой детали невозможно без разрушения или деформации стопора. К этому способу относят стопорение шплинтами, отгибными шайбами (рис. 165, *а*), вязочной проволокой (рис. 165, *б*). При фрикционном стопорении создается повышенное трение между стопоримой и стопорной деталями. К нему относят стопорение контргайками (рис. 165, *в*), пружинной шайбой (рис. 165, *г*). упругими подкладными шайбами, самоконтрящимися гайками и т. п. Однако всегда существует опасность уменьшения силы трения, а следовательно, ослабление соединения, поэтому во всех ответственных соединениях и соединениях, расположенных внутри машин, применяют только жесткое стопорение. Стопорение также осуществляют нанесением на поверхность машины лакокрасочных покрытий.

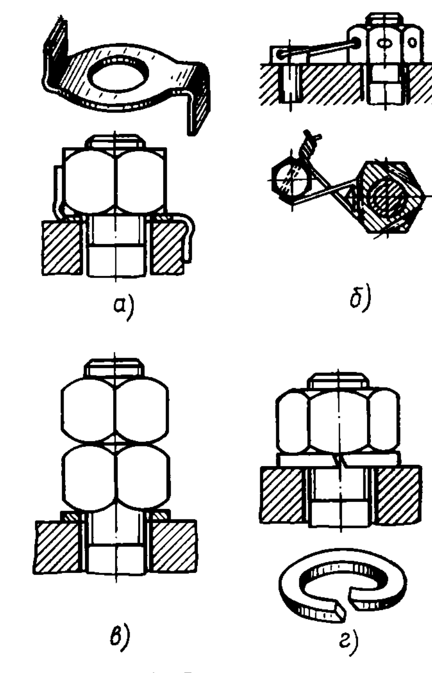


Рис. 165. Стопорение деталей:
а — отгибными шайбами, *б* — вязочной проволокой, *в* — контргайками, *г* — пружинной шайбой

§ 78. Неразбираемые соединения

Заклепочные соединения применяют, когда сборочная единица машины подвергается значительным динамическим нагрузкам, материал узла плохо поддается сварке или стоимость заклепочных соединений ниже стоимости резьбовых. В последние годы заклепочные соединения вытесняются сварными, клеевыми и резьбовыми. Как правило, материал заклепки должен быть мягче, чем материал соединяемых деталей (например, нельзя склепывать алюминиевые детали стальной заклепкой). При склепывании неметаллических материалов

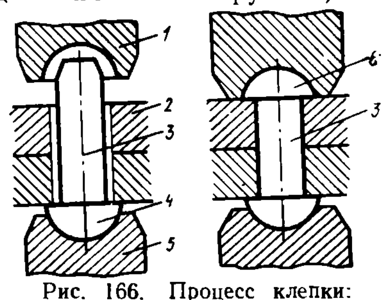


Рис. 166. Процесс клепки:
1 — обжимка, *2* — склепываемые детали, *3* — стержень, *4*, *6* — головки, *5* — поддержка

используют заклепки из алюминия или другого мягкого материала.

Процесс клепки показан на рис. 166. В склепываемых деталях 2 сверлят отверстия и совмещают их. В отверстия вводят заклепку, которая имеет закладную головку 4, полученную при изготовлении заклепки. Головка опирается на поддержку 5. Сверху на головку опускают обжимку 1 и ударами молотка по ней расклепывают стержень заклепки. При этом происходит формирование замыкающей головки 6, а стержень 3 заклепки увеличивается в диаметре и заполняет зазор, необходимый для введения заклепки в отверстие деталей. В некоторых случаях при автоматизации процесса, когда используют не готовые заклепки, а отрезанную определенного размера проволоку, заклепка не имеет головки и расклепывание осуществляется с двух сторон.

Прессовые соединения применяют для неразбираемых или (реже) для разбираемых соединений. Такие соединения осуществляют посадками с натягом. Прочность и неподвижность прессовых соединений создается и поддерживается силами упругой деформации сжатия в охватываемой и растяжения в охватывающей деталях. При других одинаковых условиях прочность сопряжения пропорциональна натягу. При одном и том же натяге она зависит от принятого способа сопряжения, материала, размера деталей, шероховатости их поверхностей, рода смазки при запрессовке, скорости запрессовки.

Сборка соединений с натягом может быть продольной (под прессом) или поперечной (с нагревом охватывающей детали или охлаждением охватываемой). Наиболее распространена сборка под прессом, чему способствует универсальность оборудования и низкая трудоемкость сборочных работ. При сборке под прессом детали соединения взаимно перемещаются по продольной оси. На качество запрессовки влияет наличие фаски. Наилучшее качество соединения получается при угле фаски 10°. Скорость запрессовки должна быть от 2 до 5 мм/с. Максимальное усилие запрессовки определяют по формуле $P=\pi pldf$ (p — давление на посадочной поверхности, Па; l и d — длина и диаметр посадочной поверхности, м; f — коэффициент трения сопрягающихся поверхностей; для сталей и чугунов в среднем 0,1—0,15).

При поперечной сборке нагревают или охлаждают детали до температуры, при которой обеспечивается нулевой натяг или зазор при сопряжении деталей. После сопряжения происходит выравнивание температуры деталей и между ними возникает натяг.

Тепловая сборка существенно (в среднем в 1,2—2,5 раза) увеличивает несущую способность соединений с натягом. Это объясняется тем, что при сборке под прессом микронеровности сминаются, а при тепловой сборке они, смыкаясь, заходят друг в друга, в результате чего повышаются коэффициент трения и прочность сцепления. Следовательно, в неразбираемых соединениях можно снизить натяг, применив тепловую сборку.

При достаточно высоком нагреве охватывающей детали (или глубоком охлаждении охватываемой) можно получить нулевой натяг или обеспечить зазор h при сборке соединения. Для получения зазора h определяют температуру охватывающей детали $t=(\Delta+h)/(d\alpha_1)+t_0$ (Δ—максимальный натяг в соединении, м; α_1 — коэффициент температурного линейного расширения материала охватывающей детали, °С; d — диаметр охватываемой детали, м; t_0 — температура помещения, °С).

Для случая охлаждения охватываемой детали $t=-(\Delta+h)/(d\alpha_2)+t_0$ (α_2 — коэффициент температурного линейного расширения материала охватываемой детали при отрицательных температурах).

Нагрев охватывающей детали не должен превышать 400°С во избежание изменения структуры металла, появления окалины, из-за которой сопряжение станет трудноразъемным, а также короблений. При охлаждении охватываемой детали эти явления не наблюдаются. Однако способ охлаждения более трудоемкий и при его использовании возможны соединения с относительно меньшими натягами.

Соединение пайкой используют в электромашиностроении чаще для соединения выводных концов обмоток. Для безотказной работы электрических машин необходимо, чтобы все соединения в обмотках и выводных концах были прочные и обеспечивали надежный контакт, поэтому их стремятся делать неразъемными. Соединения должны обладать хорошей электропроводностью, достаточной механической прочностью, неокисляемостью, отсутствием вредного влияния на изоляцию, технологичностью и быть дешевыми. Существует много способов выполнения неразъемных соединений, выбор которых зависит от материала соединяемых проводников и их сечения, характера нагрузок, усилий работы, места расположения в конструкции, производственных условий.

Пайка — это процесс соединения деталей с помощью припоя, составленного из различных металлов и имеющего более низкую температуру плавления, чем металлы соединяемых деталей. Прочность и плотность соединения достигаются благодаря способности припоя и основного металла взаимно растворяться и диффундировать. Припой должен смачивать соединяемый металл и хорошо заполнять все зазоры между плоскостями деталей. Различают припои легкоплавкие (температура их плавления ниже 300°С) и тугоплавкие (температура их плавления свыше 600°С).

Из легкоплавких широко применяют оловянисто-свинцовые припои, являющиеся сплавами олова и свинца. Припои ПОС40 и ПОС60 отличаются содержанием олова. Большое содержание олова улучшает их жидкотекучесть и адгезию. Перед пайкой соединяемые поверхности очищают от грязи и оксидов, обезжиривают и облуживают (лужение улучшает качество паяного соединения). Пайку производят ручными паяльниками или в ваннах. Соединяе-

мые концы проводов перед пайкой механически скрепляют. Пайка оловянистыми припоями имеет ряд недостатков: место пайки обладает невысокой теплостойкостью и недостаточной механической прочностью; при пайке требуются флюсы и гильзы. Оловянистый припой довольно дорог, поэтому применяется все реже.

К тугоплавким относят серебряные и медно-фосфористые припои, обладающие по сравнению с легкоплавкими более высокой механической прочностью и электрической проводимостью. Из серебряных припоев применяют Пср15 (15% серебра, 80% меди и 5% фосфора, температура плавления 635—800°С) и ПСр45 (45% серебра, 30% меди и 25% цинка, температура плавления 660—720°С). Из медно-фосфористых наиболее распространен самофлюсующийся припой ПМФ-7 (93% меди и 7% фосфора, температура плавления 705—730°С); при пайке он не требует флюса.

При пайке круглых проводов небольших сечений легкоплавкими припоями их зачищают, лудят, скручивают и паяют паяльниками или опускают в ванны с расплавленным припоем.

Пайка соединений без зазора между спаиваемыми деталями не допускается, так как невозможно проникновение припоя. При пайке легкоплавкими припоями зазор между сопрягаемыми деталями должен быть от 0,025 до 0,075 мм, при пайке тугоплавкими припоями — от 0,05 до 0,08 мм (для серебряных) и от 0,012 до 0,014 мм (для медных). Для получения надежных соединений зазор должен быть равномерным по месту спая.

Клеевые соединения применяют для получения неразъемных соединений деталей из однородных и неоднородных металлов и неметаллов. Этим способом можно соединять детали малой толщины, что позволяет избежать значительных напряжений и деформаций деталей.

Процесс склеивания состоит из следующих операций: подготовки поверхностей деталей; нанесения клея на поверхности; подсушивания; сопряжения склеиваемых поверхностей; создания условий для отвердения клея; зачистки наружных поверхностей; контроля соединения.

Для обеспечения необходимой прочности большое значение имеет толщина слоя клея, которая должна быть от 0,01 до 0,1 мм. При большой толщине в процессе затвердевания слой клея может растрескаться и отойти от поверхности детали. Шероховатые поверхности способствуют прочности клеевого соединения. На сопрягаемые поверхности клей наносят кистью, пульверизатором, шпателем, роликом и другим инструментом.

Подсушивание — это выдержка слоя клея в течение определенного времени для удаления из него растворителя. Поверхности желательно соединять не наложением, а надвиганием одна на другую во избежание попадания воздуха между ними. В таком виде поверхности сжимают прессом или специальным приспособлением до высыхания клея.

§ 79. Вращающиеся соединения

Для соединения вращающихся и неподвижных деталей и сборочных единиц электромашин служат подшипники. Из всего многобразия подшипников в электрических машинах малой мощности используют шариковые радиальные подшипники качения и подшипники скольжения на полусухом трении.

Подшипники качения по сравнению с подшипниками скольжения имеют следующие преимущества: более точное центрирование вала; более низкий коэффициент трения; небольшой момент сопротивления при пуске; малые осевые размеры; высокую взаимозаменяемость. К достоинствам подшипников скольжения относят: бесшумность в работе; способность выдерживать большие нагрузки при высокой частоте вращения; малые радиальные размеры.

Подшипники качения подразделяют на несколько классов точности. Для машин общего применения чаще всего используют подшипники нормального и повышенного класса точности, а для ма-

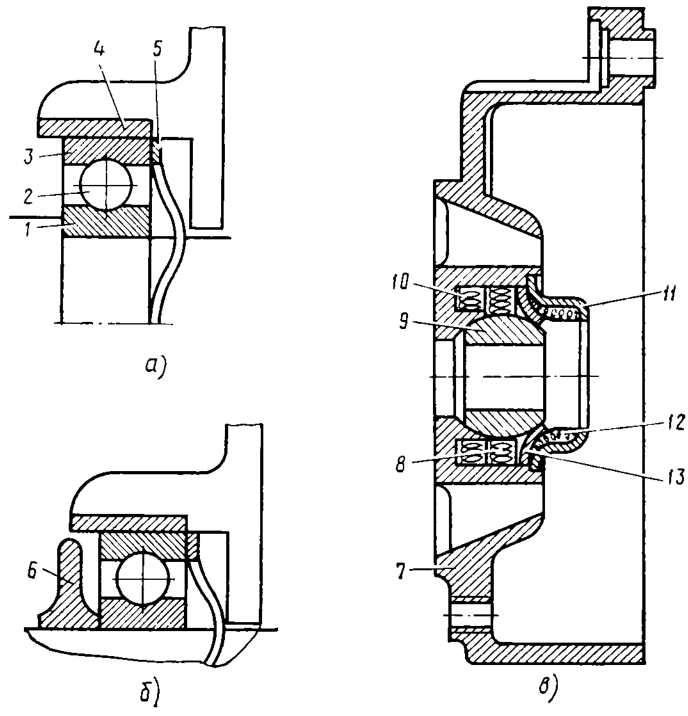


Рис. 167. Установка подшипников качения (*а* — до упора в буртик вала, *б* — до упора в упорную шайбу) и подшипника скольжения в щит (*в*):

1, 3 — кольца, 2 — шарики, 4 — втулки, 5, 6, 13 — шайбы, 7 — подшипниковый щит, 8, 10, 12 — сальники, 9 — подшипники, 11 — крышка

шин малошумных, с пониженной вибрацией, высокооборотных и специальных — высокоточные и прецизионные.

Установка подшипников качения. Способы установки подшипников качения на валах и в подшипниковых щитах зависят от условий работы машины. Рассмотрим некоторые из них, применяемые чаще всего в машинах малой мощности.

Подшипник качения (рис. 167, *а*) имеет внутреннее *1* и внешнее *3* кольца, между которыми располагаются шарики *2*. Основным способом установки внутреннего кольца на валу является посадка его с натягом. Фиксация внутреннего кольца в осевом направлении возможна буртиком на валу. Радиус галтели при условии плотного прилегания торца кольца к буртику должен быть не менее 0,8 *R* радиуса галтели кольца подшипника. Наружное кольцо устанавливают в щите по переходной посадке. При работе машины наружное кольцо должно иметь возможность незначительно перемещаться по отношению к посадочной поверхности щита, в противном случае при нагревании машины и различном удлинении разных частей машины подшипник может заклинить. Между наружным кольцом и щитом в осевом направлении устанавливают пружинную шайбу *5*, которая постоянно поджимает наружное кольцо в осевом направлении, выбирая возможный зазор между ним и шариками. Для обеспечения надежной посадки подшипника в щит установлены стальные втулки *4*.

Если по условиям конструкции невозможно обеспечить нужную высоту буртика, то для фиксации подшипника на вал по посадке с натягом устанавливают шайбу *6* (рис. 167, *б*), которая со стороны подшипника имеет буртик необходимой высоты. Кроме того, шайба служит для защиты подшипника от попадания в него грязи и вытекания смазки. После установления шайб производят механическую обработку их торцов для получения точного междуцентрового расстояния.

Установка подшипников скольжения. Подшипники скольжения изготовляют прессованием металлопорошков и разделяют на цилиндрические и сферические. Цилиндрические подшипники обычно запрессовывают в подшипниковый щит, а затем обрабатывают их внутреннюю поверхность. Сферические подшипники являются самоустанавливающимися и после сборки могут незначительно сместиться в осевом направлении и стать точно по линии вала. Эти подшипники чаще всего применяют в машинах бытового назначения. Сборку сферических подшипников выполняют так. Подшипник *9* (рис. 167, *в*) устанавливают сферической поверхностью в конусное гнездо подшипникового щита *7*, в гнездо и на подшипник помещают пропитанные в масле сальники *10* и *8* и прижимают их к опорной поверхности пружинной шайбой *13*. Эта шайба удерживается крышкой *11*, которую устанавливают на опорную поверхность в щите и закрепляют обжатием, раскаткой или кернением металла подшипникового щита. Между пружинной шайбой и крышкой располагают сальник *12*. Подшипники и сальники пропитывают маслом МБТ-9, И40А или смесью масел БЗВ и МС-20. После сборки контролируют момент проворачивания подшипника относительно щита в плоскости вала.

§ 80. Сборка сердечника ротора с валом

Сборка сердечника ротора с валом заливкой пластмассы и алюминия рассмотрена в предыдущих параграфах. Эти способы используют, когда сердечник ротора изготовлен из хрупкого материала и невозможно осуществить сборку другим способом или сильно усложняется конструкция ротора.

В большинстве случаев сборка сердечника ротора с валом осуществляется посадкой с натягом, пластическим деформированием крайних листов сердечника и склеиванием. Сопрягаемые поверхности должны быть обработаны с высокой точностью и иметь небольшую шероховатость. Для выполнения этих требований валы обрабатывают механически, при этом конечной операцией является шлифовка. Чтобы поверхность валов имела высокую твердость, их подвергают термической обработке. Сердечники роторов набирают из штампованных листов электротехнической стали. Качество поверхности, сопрягаемой с валом, зависит от многих причин, в том числе от качества штамповки и сборки, принятой технологии заливки алюминия и т. п. Поскольку сборкой не всегда можно получить необходимую точность и чистоту внутренней поверхности ротора, ее перед сборкой обрабатывают чаще всего прошивкой или дорном.

Сборка сердечника ротора с валом посадкой с натягом. В машинах малой мощности при сборке сердечника ротора с валом посадкой с натягом обработку гладкого вала производят с допуском $r6$, $s7$, накатанного — $r6$, $u8$, а отверстия в сердечнике — $H7$, $H8$.

Для примера рассмотрим технологический процесс сборки сердечника с валом электродвигателя с высотой оси вращения 56 мм (см. рис. 9). Поверхность вала под посадку сердечника обрабатывают шлифовкой до размера $17\,s\,7\begin{pmatrix}+0{,}046\\+0{,}028\end{pmatrix}$, а отверстие в сердечнике должно иметь размер $17H7$ $(+0{,}018)$. Для получения отверстия с таким допуском его прошивают. Прошивка (рис. 168, *а*) — дорогой инструмент, требующий постоянной заточки. При обработке прошивкой в отверстии оставляют допуск 0,2 мм, который срезают зубьями прошивки. Каждый зуб прошивки имеет подъем на 0,05 мм, а два последних зуба — одинаковый размер. Для прошивки сердечник устанавливают в приспособление (рис. 169), сверху размещают прошивку и прессом продавливают ее через отверстие.

Отверстие можно обрабатывать дорном (см. рис. 168, *б*) или разверткой. При этом в отверстии оставляют допуск 0,05 мм. Об-

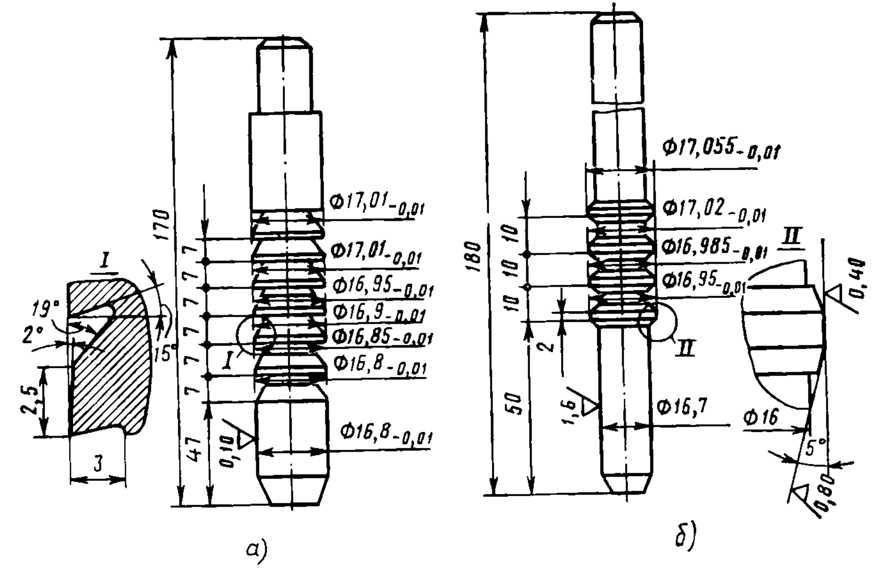


Рис. 168. Инструмент для обработкн отверстня сердечника ротора, залитого алюминнем:
а — прошивка, *б* — дорн

работку дорном выполняют так же, как и прошивкой. Дорн снимает неровности в отверстии.

Холодную запресовку вала производят на прессе, используя то же приспособление, что и при прошивке (рис. 170). На приспособление *1* устанавливают сердечник *2* и вал *3* и прессуют вал оправкой *4* до ее упора в буртик *5*. Вал должен быть запрессован так, чтобы от края сердечника до края вала получился размер ($103 \pm 1{,}0$) мм. Это обеспечивается тем, что оправка имеет размер $103 \pm 0{,}25$) мм.

После запрессовки сердечник удерживается от продольных и поперечных перемещений усилием натяга. В рассматриваемом случае минимальный натяг будет составлять 17,028—17,018 = 0,01 мм, а максимальный — 17,046—17,0 = 0,046 мм.

Если произвести тепловую сборку, то сердечник надо нагреть до температуры, при которой натяг будет отсутствовать. Эту температуру можно определить по формуле, приведенной в § 78, при исходных данных: $\Delta = 0{,}046 \cdot 10^3$; $t_0 = 20$°C; $d = 17 \cdot 10^3$ м; $\alpha_1 = 12 \cdot 10^{-6}$ °C:

$$t = \frac{0{,}046 \cdot 10^3}{17 \cdot 10^3 \cdot 12 \cdot 10^{-6}} + 20 = 246 \text{ °C}.$$

Сборка сердечника с валом пластической деформацией крайних листов. При уменьшении диаметра (менее 10—12 мм) трудно изго-

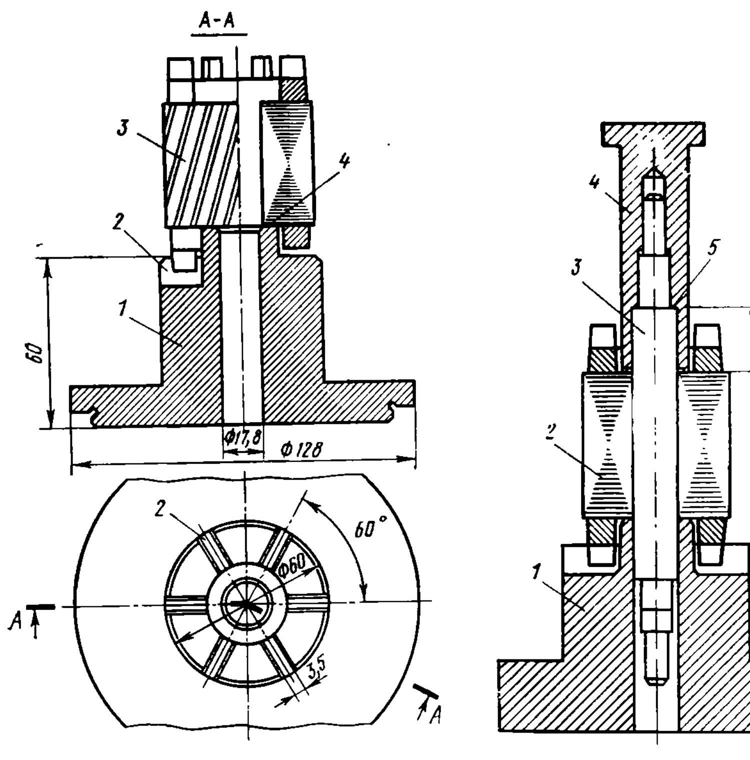


Рис. 169. Прнспособление для обработки отверстия:
1 — оправка, *2* — пазы, *3* — сердечник, *4* — поверхность сердечнnка

Рис. 170. Схема запрессовкн вала в сердечннк

товить вал с несколькими ступенями и выдержать требования к чистоте, плоскостности и некруглости его поверхности, биению выходного конца. Кроме того, значительно повышается трудоемкость изготовления вала. Поэтому валы с такими диаметрами изготовляют гладкими, без ступеней. Крепление сердечников на валы с диаметром от 7 до 12 мм производят деформацией их крайних листов. Деформацию (обжатие) выполняют в специальных приспособлениях обжимкой, диаметр которой на 2 мм больше диаметра вала. Первоначальный зазор между сердечником и валом составляет 0,02—0,03 мм. Лучшие результаты получают при вибрационном обжатии с частотой 15—25 тыс. ударов в минуту. Пластической деформации подвергают два-три крайних листа.

Сборка сердечника ротора с валом склеиванием. Валы диаметром менее 7 мм соединяют склеиванием. Технологический процесс очень трудоемок и пока плохо поддается механизации. Технология склеивания во многом зависит от применяемого клея. Чаще

всего использовался клей БФ-4. При работе с ним требовалось большое количество операций: предварительная промывка вала; окончательная промывка вала; нанесение клея на вал; сушка, промывка отверстий ротора; сборка вала и ротора; зачистка излишков лака; сушка ротора с валом; проверка качества склейки.

Клей БФ-4 используют для соединения сборочных единиц, работающих при температурах от —60 до +120°С. Клей разводят до вязкости 50 с по вискозиметру ВЗ-4 и фильтруют через 4—5 слоев марли. Готовый клей хранят в плотно закрытой посуде. Перед склейкой детали промывают в пожаро- и взрывобезопасных жидкостях (трихлорэтилен МЛ-51) и сушат в течение 0,5 ч. Клей наносят на детали дважды и после каждого раза сушат 0,5 ч. После сборки изделия клей сушат в две ступени: 30 мин при 60°С и 2 ч при 120°С.

Клей БФ-4 имеет ряд недостатков, поэтому некоторые заводы выполняют склейку клеями ГИПК-238 или ВК-1 на эпоксидной основе. Высокое качество склейки получают при использовании анаэробных уплотняющих составов, которые не имеют растворителей и твердеют при отсутствии воздуха. Анаэробный синтетический материал в жидкотекучем состоянии наносят на склеиваемую деталь. После монтажа деталей при отсутствии доступа воздуха материал твердеет и становится стойким к растворителям. В результате сильного капиллярного действия жидкотекучий материал проникает в глубину микронеровностей поверхности соединяемых деталей. Другое преимущество этих материалов состоит в том, что их можно наносить вручную, полуавтоматическим или автоматическим способами.

Такую же технологию нанесения используют при соединении самых различных деталей машин малой мощности.

§ 81. Сборка сердечника статора с корпусом

Сборку сердечника статора с корпусом электрических машин малой мощности можно выполнять заливкой алюминиевого корпуса на сердечник, посадкой с натягом, на клею, заливкой компаундом. Сборка заливкой алюминия была описана ранее. Рассмотрим остальные способы.

Сборка посадкой с натягом. При сборке посадкой с натягом поверхность в корпусе под сердечник обрабатывают с допуском *H*7, а наружную поверхность сердечника с допуском *h*6, *n*6, *s*7. Сборку, как правило, производят только тепловую. При холодной сборке корпус, имеющий тонкие стенки, может получить трещину и разрушиться. Корпуса нагревают в печах или индукционным способом.

Приспособление для индукционного нагрева корпусов представляет собой трансформатор, в котором нагреваемый корпус

является вторичным витком (рис. 171). Верхнее ярмо *2* трансформатора установлено на оси *1* и может двигаться в сторону для установки корпуса *3* электродвигателя на стержень трансформатора. При включении напряжения в первичную обмотку *4* по корпусу *3* проходнт большой ток и нагревает его в короткое время. Большой ток в корпусе возникает вследствие его очень малого сопротивления. Отключение электрического тока происходит автоматически при достижении заданной температуры корпуса.

В нагретый алюминиевый корпус устанавливают сердечник и дают корпусу остыть.

Рис. 171. Приспособление для индукционного нагрева корпуса

Сборка на клею. Сборка сердечника на клею осуществляется по такой же технологии, что и сборка сердечника ротора. Сердечник покрывают клеем, а на корпус его не наносят. Фирменные таблички, щиты, втулки также крепят на клею.

Сборка заливкой компаунда. В ряде ответственных машин после установки сердечника в корпус производят заливку статора эпоксидным компаундом для повышения надежности работы, а также крепления некоторых конструктивных элементов.

Перед заливкой внутреннюю поверхность сердечника и резьбовые отверстия изолируют специальным приспособлением. Затем сушат корпус 1—2 ч при 100—120°С. Заливают шприцем в отверстие приспособления компаунд и сушат его 1 ч при 130°С, затем доливают компаунд и сушат до полного отверждения.

Статоры, залитые компаундом, необходимо подвергать термической стабилизации, чтобы сохранить геометрические размеры изделия при его работе. Для термической стабилизации залитое изделие помещают в камеру с холодом и выдерживают некоторое время, затем извлекают и дают возможность принять комнатную температуру, помещают в камеру тепла и выдерживают некоторое время. Цикл повторяют несколько раз.

Контрольные вопросы

1. Какие методы достижения точности при сборке вы знаете?
2. Приведите примеры разбираемых, неразбираемых и вращающнхся соединений.
3. Как устаяавливают подшипники качения?
4. Какне существуют способы соединения сердечника ротора с валом?

§ 82. Балансировка роторов (якорей)

Требования к балансируемым роторам (якорям). В собранном роторе главная ось инерции редко совпадает с осью вращения. Это объясняется тем, что при заливке алюминием детали ротора устанавливают в пресс-форму с определенными допусками, при укладке обмотки не удается разместить ее совершенно равномерно по окружности и в пазах, при пропитке обмотки лаками возможна различная плотность лака в пазах и т. п.

Роторы, у которых ось инерции не совпадает с осью вращения, называют *неуравновешенными*. В зависимости от расположения оси инерции относительно оси вращения различают три вида неуравновешенности: статическую, моментную и динамическую. При вращении ротора неуравновешенность вызывает вибрацию, которая разрушает подшипники, обмотку, ухудшает коммутацию, нарушает нормальную работу приводимого во вращение механизма. Для устранения вредного влияния неуравновешенности вращающиеся детали подвергают балансировке.

Балансировка — технологическая операция, в процессе которой определяют размер и место неуравновешенной массы, после чего ее уравновешивают, добавляя грузы в легком месте или удаляя часть металла с тяжелых мест. Так как полностью устранить неуравновешенность невозможно, ГОСТ 12327—79 регламентирует допустимые значения остаточной (после операции балансировки) неуравновешенности.

Установлено три класса точности уравновешивания: нулевой, первый и второй. Наименьшую остаточную неуравновешенность допускает нулевой класс. Значения остаточной неуравновешенности в одном классе точности для роторов с разной массой различны.

Роторы электрических машин в зависимости от их массы разделяют на три группы: микророторы (от 0,01 до 0,1 кг), малые (свыше 0,1 до 3 кг), средние (свыше 3 до 1000 кг).

Для электрических машин общего назначения с обычными требованиями по уровню вибрации достаточно уравновешивания по второму классу точности. Их собирают, как правило, с подшипниками класса Н. Уравновешивание по первому классу точности рекомендуется для электрических машин с повышенными требованиями по уровню вибрации, например электрических машин для станков повышенной точности, электрических машин с подшипниками классов П и В. Уравновешивание по нулевому классу точности необходимо для электрических машин, работающих с подшипниками классов А и С.

Второй класс точности уравновешивания может быть получен при балансировке ротора на окончательно обработанных шейках вала. Роторы с первым классом точности уравновешивания рекомендуется уравновешивать на балансировочном станке в собственных подшипниках. Балансировку ротора с нулевым классом точности уравновешивания необходимо производить на балансировочном станке в собственных подшипниках (или на внутренних кольцах подшипников). В конструкции таких электрических машин должна быть предусмотрена подбалансировка в окончательно собранной машине.

Роторы электрических машин и детали, устанавливаемые на отбалансированный ротор (вентиляторы, коллекторы, муфты, шкивы), должны быть уравновешены, т. е. конструкция ротора (детали), если точно соблюдены номинальные размеры и однородность материала, должна обеспечивать отсутствие неуравновешенности при вращении. Если детали крепятся на роторе с помощью шпонки, они должны балансироваться со шпонкой, а ротор без шпонки.

Остаточную неуравновешенность измеряют в граммах на сантиметр или в граммах на миллиметр. Значение допустимой после балансировки остаточной неуравновешенности для каждого ротора указывают в чертеже. Кроме того, в чертеже указывается место для добавления груза или снятия металла (плоскости исправления), способ, которым это выполняют, и способ балансировки. Плоскости исправления могут предусматриваться на конструктивных элементах ротора (нажимные шайбы, вентиляторы, обмотки) или создаваться специальными балансировочными кольцами. В роторах, имеющих большой диаметр по отношению к длине ($L/D<0{,}2$), ГОСТ допускает одну плоскость исправления, в других случаях ($L/D\geqslant0{,}2$) — две.

Существуют два способа балансировки: статический и динамический. Роторы с одной плоскостью исправления допускается балансировать статическим способом, а с двумя плоскостями — только динамическим способом.

Статическую балансировку выполняют на двух параллельных призмах *1* (рис. 172), поверхность которых должна иметь шероховатость не выше Ra 0,50, а отклонение плоскости призмы от горизонтали — не выше 0,1 мм на 1 м длины призмы. Ширина рабочей поверхности призмы должна быть $a=M/(2d)$ (M — масса ротора, кг; d — диаметр шейки вала, мм).

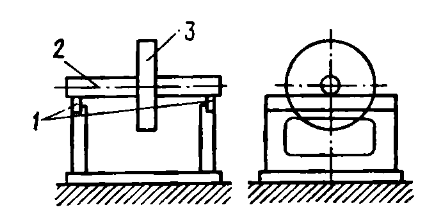


Рис. 172. Схема статической балансировки на призмах

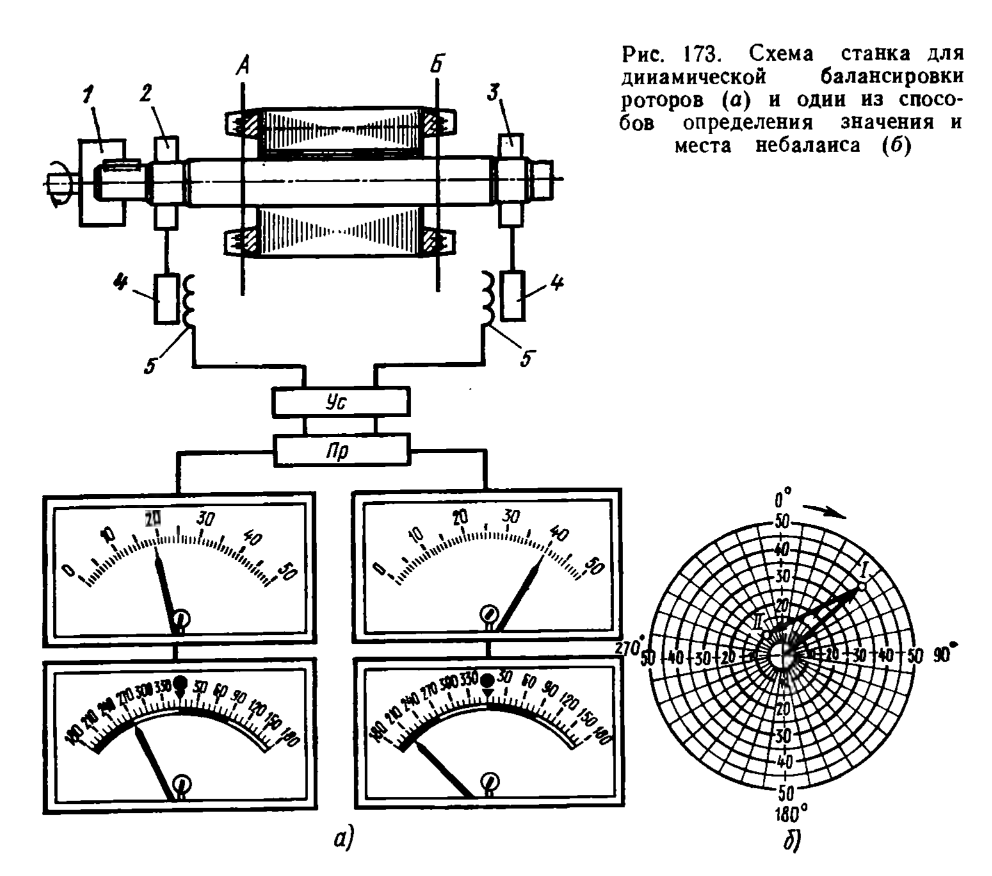


Рис. 173. Схема станка для динамической балансировки роторов (*а*) и один из способов определения значения и места небаланса (*б*)

Балансировку производят так. Если деталь не имеет вала, то ее надевают на технологический вал. Устанавливают ротор (деталь) *3* валом *2* на призмы и выводят из равновесия, слегка толкнув рукой так, чтобы он покатился по призмам. Покатившись, ротор после нескольких оборотов и качаний остановится тяжелым местом вниз. Заметив это место, снимают с него часть металла или добавляют металл на легкое место, которое расположено диаметрально противоположно тяжелому. Массу уравновешивающего груза обычно определяют опытным путем. Так поступают до тех пор, пока ротор не станет останавливаться без качаний, располагаясь любым местом вниз, т. е. перейдет в состояние безразличного равновесия. Опытному балансировщику достаточно 2—3 раза прокатать ротор по призмам.

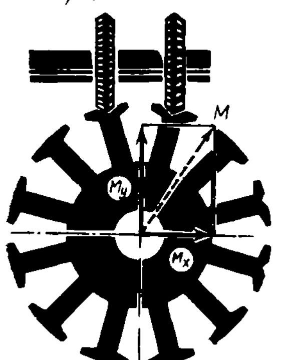


Рис. 174. Устранение небаланса фрезеровкой сердечника

Динамическую балансировку выполняют при вращающемся роторе на балансировочных станках. Неуравновешенность устраняют в двух плоскостях исправления поочередно: сначала в *А*, а затем в *Б*. Ротор, подлежащий балансировке, устанавливают шейками под подшипник на опоры *2* и *3* (рис. 173, *а*) станка. Опоры станка могут легко перемещаться в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси вала. Неуравновешенный ротор приводят во вращение через приводную муфту *1*. Вращаясь, ротор вызывает колебания опор, которые через тяги передвигают магниты *4*, перемещающиеся в катушках *5*. В катушках наводится эдс, пропорциональная частоте и амплитуде колебаний роторов. После усиления и ряда преобразований эдс получают два сигнала, один из которых пропорционален амплитуде колебаний ротора (значение небаланса), а другой — углу между линией, принятой за начало отсчета, и наиболее тяжелым местом на роторе. Верхние приборы показывают значение небаланса, а нижние — его местонахождение на роторе отдельно для правой и левой сторон исправления. Как правило, угол расположения небаланса (тяжелого места) отсчитывают от шпоночного паза на валу ротора. После исправления небаланса ротор проверяют на соответствие требованиям чертежа и прекращают балансировку, если требования выполняются.

Существуют также другие способы указания значения и места нахождения небаланса, один из которых показан на рис. 173, *б*. Небаланс определяется вектором, а угол его расположения — отклонением вектора от нулевой линии.

Способы устранения неуравновешенности. Основные способы устранения неуравновешенности — съем (удаление) металла в тяжелом и добавление груза в легком месте. При автоматизации процесса чаще всего используют способ удаления металла сверлением сердечника с торца ротора или фрезерованием поверхности дисковыми фрезами. Фрезерованию подвергают зубцы (рис. 174), однако вектор неуравновешенности M не всегда совпадает с серединой зубца, поэтому его раскладывают на две составляющие M_y, M_x по двум предварительно заданным осям. Глубина фрезерования постоянна, а объем снимаемого металла зависит от длины фрезерования.

Для добавления груза устанавливают в шлицы пазов (поверх изоляционных клиньев) медные клинья, поскольку медь не проводит магнитный поток и имеет большую удельную массу. В роторах, имеющих обмотки, неуравновешенность устраняют нанесением на лобовую часть обмотки эпоксидной массы.

§ 83. Сборка подшипников

В машинах малой мощности используют шариковые подшипники качения и подшипники скольжения, прессованные из металлопорошков. Подшипники качения могут поставляться на завод с

защитными шайбами или уплотнителями и рабочей смазкой, заложенной на заводе-изготовителе на весь срок службы подшипника, или заполненные консервационной смазкой. Подшипники с заложенной смазкой распаковывают и устанавливают в изделие, а подшипники с консервационной смазкой расконсервируют. Расконсервация включает промывку подшипника в растворах. Их состав зависит от смазки, которой консервирован подшипник, и выбирается технологом. После промывки подшипник высушивают, набивают рабочую смазку и устанавливают в изделие.

При работе с подшипниками нельзя касаться их голыми руками во избежание появления коррозии. Руки должны быть чистыми, сухими. Необходимо пользоваться специальными приспособлениями, пинцетами, напальчниками, конденсаторной бумагой и т. п.

Промытые подшипники нельзя оставлять на воздухе более 2—3 ч без средств защиты. При длительном хранении их следует помещать в эксикаторы (стеклянные приборы), на дне которых должен находиться технический селикагель. Изменение окраски селикагеля на сиреневую или розовую показывает, что он насытился влагой и его следует просушить (сушку выполняют в печах).

Для посадки подшипников качения валы обрабатывают с допусками $k4$, j_s5, $k5$, j_s6, $k6$, а гнезда в подшипниковых щитах для установки наружной обоймы подшипника — с допусками $G5$, $G6$, $H6$, $H7$, J_s7.

Сборка подшипников качения в машинах общепромышленного исполнения. В машинах общепромышленного исполнения (см. рис. 9) наиболее часто используют подшипники с заложенной рабочей смазкой. С таких подшипников снимают упаковку и напрессовывают на вал до упора внутреннего кольца подшипника в буртик на валу. В зависимости от принятой технологии напрессовать можно подогретый или холодный подшипник. Усилие пресса обязательно должно быть приложено к внутреннему кольцу; оно может быть постоянным или вибрационным. При использовании вибрации уменьшается усилие запрессования и повышается качество прессового соединения. Внутреннее кольцо напрессовывается на вал, как правило, по посадке с натягом.

Наружное кольцо устанавливают в подшипниковый щит при его сборке с двигателем. Оно имеет переходную посадку и при работе машины может незначительно перемещаться в осевом направлении. Свобода перемещения необходима для компенсации изменения линейных размеров отдельных узлов машины при ее нагревании во время работы.

В машинах общепромышленного исполнения сборку подшипников производят методом полной взаимозаменяемости.

Сборка подшипников качения в машинах специального исполнения. Машины специального исполнения имеют, как правило, валы маленького диаметра. Обработать валы с необходимыми допусками трудно, а в некоторых случаях невозможно. Натяги в посадке подшипника на вал составляют 1—2 мкм и обеспечить их сборку методом полной взаимозаменяемости практически невозможно. Поэтому при сборке используют метод групповой взаимозаменяемости (селективной сборки).

Перед сборкой измеряют валы и отверстие во внутреннем кольце подшипника с точностью до 1 мкм и рассортировывают подшипники и валы по фактическим размерам. Затем подбирают валы и подшипники, которые обеспечили бы натяг в заданных чертежом размерах, и собирают их.

Сборка подшипников скольжения. Для нормальной работы машины зазор между валом и подшипником скольжения должен быть в пределах 3—10 мкм. Такой зазор можно получить точной обработкой детали, что экономически нецелесообразно, так как стоимость обработки растет непропорционально повышению точности, а в третьей степени. Поэтому обработку производят по более низкому классу точности, а необходимый зазор при сборке получают, используя метод селективной сборки.

Сборку подшипника осуществляют в подшипниковый щит *7* (см. рис. 167, *в*). Сначала устанавливают сальник *10*, подшипник *9*, сальник *8* и фиксируют пружинной шайбой *13*. Затем устанавливают сальник *12* и все закрывают защитной крышкой *11*, которую крепят развальцовкой. После сборки с валом подшипник *9* самоустанавливается. Для фиксации вала в осевом направлении на валу предусматривают пластмассовые втулки (см. рис. 38), упор на одном и втулку на другом конце вала (см. рис. 33). Смазка, находящаяся в подшипнике и войлочных уплотнениях, обеспечивает нормальную работу подшипника в течение всего срока службы.

§ 84. Сборка машин

Основными организационными формами сборки микромашин являются стационарная и подвижная.

При стационарной сборке машину полностью собирают на одном рабочем месте. Все детали и узлы, требуемые для сборки, поступают на рабочее место. Стационарную сборку применяют в единичном и серийном производстве и выполняют концентрированным или дифференцированным способом. При концентрированном способе сборочный процесс не расчленяют на операции и сборку электрической машины от начала до конца осуществляет один рабочий или одна бригада. При дифференцированной сборке сборочный процесс расчленяют на операции, каждую из которых выполняют различные рабочие или бригады.

При подвижной сборке машина перемещается от одного рабочего места к другому. Рабочие места оснащены необходимым сбо-

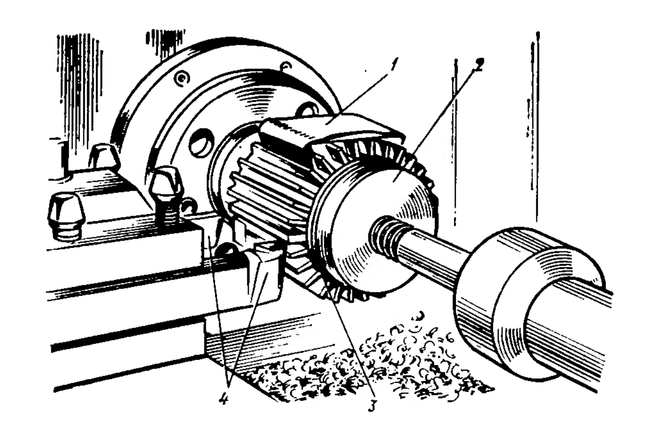


Рис. 175. Обработка замков статора

рочным инструментом и приспособлениями, на каждом месте выполняется одна и та же операция. Подвижную сборку применяют в крупносерийном и массовом производстве и выполняют только дифференцированным способом. Такая форма сборки является более прогрессивной, поскольку позволяет специализировать сборщиков на определенных операциях, в результате чего повышается производительность труда. В процессе производства объект сборки должен последовательно переходить от одного рабочего места к другому по потоку. Длительность любой сборочной операции на линии сборки должна быть равна или кратна ритму сборки изделия, чем достигается непрерывность процесса.

Ритм сборки на конвейере является планирующим началом для организации работы не только сборочного, но и всех заготовительных и вспомогательных цехов завода.

Выбор технологического процесса сборки, порядка следования операций, оборудования зависит от конструкции и объема выпускаемых машин, степени их унификации, конкретных условий на заводе.

При поточно-массовом производстве электродвигатели собирают на комплексно-механизированных линиях. Как правило, технологический поток состоит из двух линий: линии сборки статора и линии сборки двигателя.

Рассмотрим сборку трехфазного асинхронного микродвигателя серии 4А с высотой оси вращения 56 мм (см. рис. 9). На первой сборочной линии выполняют сборку статора.

На первую позицию поступают сердечник статора и корпус. Осуществляется запрессование сердечника в корпус (см. § 81). После остывания корпуса обрабатывают его замки, для чего статор устанавливают внутренним отверстием на разжимную оправку и поджимают с другой стороны крышкой *2* (рис. 175), которая од-

новременно закрывает обмотку от попадания стружки. Выводные концы закрывают крышкой *1* и одновременно двумя резцами *4* протачивают два замка *3*. Проточку двух замков выполняют за один установ, что обеспечивает максимальную соосность внутренней поверхности статора и двух замков, а также замков между собой.

На следующей операции производят фрезерование поверхности лап и сверление в них отверстий. Статор центрируют на оправке *2* (рис. 176) и устанавливают на замки *1*, после чего оправку разжимают. Фрезами *3* фрезеруют поверхности лап, обеспечивая размер h (высоту оси вращения двигателя). Отверстия в лапах сверлят четырехшпиндельной головкой сразу все. При подходе сверл к лапам накладывается кондуктор, а потом по нему происходит сверление. При этом должны быть выдержаны размеры между лапами l_{10} и расстояние l от лапы до замка.

На последних операциях крепят паспортную табличку и собирают коробку выводов. Укладывают необходимые прокладки в основание коробки и закрепляют их. Устанавливают колодку зажимов, крепят ее, прикрепляют к ней выводные концы из машины и закрывают крышкой. Ставят пробки и уплотнения и крепят их. Далее статор передают на сборку двигателя.

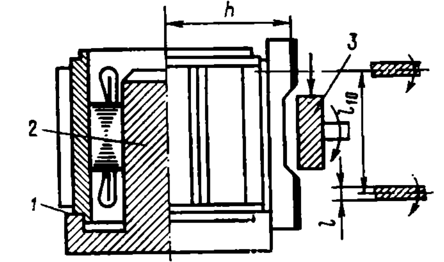


Рис. 176. Фрезерование лап и сверление в них отверстий

Сборку двигателя производят на второй конвейерной линии. На первой операции статор продувают сжатым воздухом и заводят в него ротор, на который уже напрессованы подшипники. Надевают два подшипниковых щита и на прессе осуществляют посадку щитов на замки статора. Затем устанавливают три шпильки и завертывают гайки. Проверяют рукой легкость вращения ротора. Надевают вентилятор и его кожух и крепят последний винтами. Завертывают болт заземления и отправляют двигатель на испытания. После испытания его окрашивают и отделывают, консервируют и упаковывают.

При сборке двигателя в массовом производстве широко применяют многошпиндельный инструмент для сверления и завертывания болтов, различные прессы для напрессовки подшипников, подшипниковых щитов и других деталей, а также высокомеханизированный инструмент, которым оснащают каждое рабочее место.

Несколько по-другому построен технологический процесс сборки однофазного электродвигателя типа КДР. Этот двигатель фланцевого исполнения отличается по конструкции (см. рис. 33) от рассмотренного двигателя серии 4А. Проектируя двигатель КДР,

конструктор стремился изготовить его с высокой технологичностью, в частности свести к минимуму механическую обработку. Двигатель не имеет корпуса. Подшипниковые щиты фиксируют на замки, выполненные на торцах сердечника.

Общую сборку электродвигателя выполняют так. На вал запрессовывают сердечник и две втулки. Подбирают подшипники селективным методом, обеспечивая зазор между ними и валом в пределах 0,008—0,016 мм. Собирают подшипниковый щит так, как указано в § 79. Затем комплектуют детали и подают их на конвейер общей сборки.

На конвейере общей сборки устанавливают статор и ротор в приспособление и определяют необходимое количество шайб для получения зазора в пределах 0,3—0,8 мм. Затем устанавливают шайбы, заводят ротор в статор, надевают подшипниковые щиты, устанавливают четыре винта и завертывают гайки четырехшпиндельным гайковертом с крутящим моментом 1,9—2,9 Н·м. Минимальное усилие затяжки должно обеспечивать надежное крепление щита, а максимальное усилие не должно деформировать сердечник и другие детали (усилие затяжки гайки должно быть меньше усилия прессования сердечника). После сборки проверяют плавность вращения ротора, отсутствие заеданий, значения осевого люфта, радиального биения и усилия затяжки. Устанавливают контактодержатель, вставив в него выводные провода и изоляционную панель. На корпус наклеивают заводской щиток с данными двигателя. После сборки двигатели отправляют на приемо-сдаточные испытания.

Объем приемо-сдаточных испытаний оговаривается в ГОСТах и технических условиях на электрические машины. Общие методы испытания машин общепромышленного применения приведены в ГОСТ 11828—75.

Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса и между обмотками. Сопротивление изоляции обмоток измеряют в практически холодном и нагретом состояниях машины (при температуре обмоток, близкой к температуре режима работы) до и после испытания изоляции обмоток на электрическую прочность. Для измерения сопротивления изоляции используют мегаомметры на 500 (для электрических машин номинальным напряжением до 500 В включительно) и 1000 В (для электрических машин номинальным напряжением свыше 500 В). Сопротивление изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками измеряют поочередно для каждой независимой электрической цепи при соединении всех остальных цепей с корпусом машины.

Измерение сопротивления обмоток при постоянном токе в практически холодном состоянии. Сопротивление обмоток измеряют в практически холодном состоянии машины (если их температура отличается от температуры окружающей среды не более чем на ±3 °С) одним из следующих способов: вольтметра и амперметра; одинарного или двойного моста; омметра логометрической системы. Не допускается способ измерения одинарного моста для сопротивлений меньше 1 Ом. Во избежание нагрева обмоток измерительный ток должен быть не более 15—20% номинального тока данной обмотки, а длительность его протекания — не более 1 мин. Приборы подбирают так, чтобы класс точности был не ниже 0,5, а измеряемые значения находились в пределах 20—95% шкалы. Отсчеты рекомендуется производить одновременно.

Испытание машин при повышенной частоте вращения. Испытание проводят либо в режиме генератора повышением частоты вращения приводного двигателя либо в режиме двигателя, причем для бесколлекторных машин переменного тока — повышением частоты питания. После испытания тщательно осматривают вращающиеся части. Для машин с коллекторами или контактными кольцами рекомендуется измерять биение узлов до и после испытаний.

Испытание изоляции обмоток на электрическую прочность относительно корпуса машины и между обмотками и на электрическую прочность междувитковой изоляции. Это испытание проводят при синусоидальном напряжении частотой 50 Гц. Испытательное напряжение устанавливается в зависимости от типа, мощности и номинального напряжения машины. Для машин мощностью до 15 кВт включительно на номинальные напряжения до 660 В при массовом выпуске на конвейере при приемо-сдаточных испытаниях допускается заменять испытания, указанные ранее, испытанием в течение 1 с при напряжении, повышенном на 20% против принятого при испытании в течение 1 мин. Испытанию изоляции относительно корпуса и между обмотками подвергают поочередно каждую электрически независимую цепь. Для этого на испытываемую обмотку подают высокое напряжение, а все остальные обмотки соединяют с корпусом машины. К корпусу на время испытаний присоединяют второй вывод источника высокого напряжения. Таким образом, у испытываемой обмотки проверяют прочность изоляции на корпус и между всеми остальными обмотками. Годной считается такая изоляция обмотки, у которой за время испытания не произошло пробоя или перекрытия разрядом.

Изоляцию обмотки между смежными ее витками испытывают в течение 3 мин повышенным напряжением. Это испытание проводят при холостом ходе электрической машины подводимым (при испытании в режиме двигателя) и генерируемым (при испытании в режиме генератора) напряжением, превышающим на 30% номинальное.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под технологической операцией балансировки?
2. Как выполняют статическую и динамическую балансировку роторов?
3. В чем отличие сборки подшипников в машинах общепромышленного и специального исполнения?
4. Как собирают подшипники скольжения?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие и совершенствование машин малой мощности, особенно предназначенных для специальной техники, происходит весьма интенсивно. Улучшение основных параметров машин, работающих в системах автоматического регулирования, робототехнике, позволяет повышать качество систем, их точность и производительность. Получаемый эффект часто в несколько десятков и сотен раз превышает затраты на совершенствование машины. Данное обстоятельство тем более важно, что машины малой мощности имеют достаточно сложную конструкцию и технологию изготовления, а применять приходится специальные материалы, имеющие высокую стоимость. Однако все затраты окупаются эффектом, получаемым при использовании машин.

Читатель должен помнить, что, работая в сложных системах, машины должны иметь высокую надежность и сохранять параметры в течение всего срока службы. Это достигается тщательной разработкой конструкции и технологических процессов.

Основное внимание необходимо обращать на точность соблюдения технологического процесса: не контроль завершенного изделия создает качество, качество изделия определяется тщательностью выполнения каждой технологической операции.

Авторы надеются, что учебное пособие поможет молодым рабочим разобраться в сложных вопросах принципа действия, устройства и технологии изготовления машин малой мощности.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Антонов М. В. Технология сборки электрических машин и аппаратов. М., 1986.

Испытание электрических микромашин / Н. В. Астахов, Е. М. Лопухина, В. И. Медведев и др. М., 1984.

Кацман М. М., Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических систем. М., 1979.

Клоков Б. К. Обмотчик электрических машин. М., 1987.

ОГЛАВЛЕНИЕ